INVESTIGACION y CIENCIA

¿SE ENCUENTRAN EN PELIGRO LAS PESQUERIAS?

LA TORRE INCLINADA DE PISA

MECANISMOS CEREBRALES DE LA CONCIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LACTANCIA



FEBRERO 1996
800 PTAS.




Febrero de 1996 Número 233

SECCIONES



Portada: *La nodriza*, de Alfred Roll, cortesía del Museo de BBAA de Lille. Giraudon/Art Resource

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Roberto Osti
8-9	Laurie Grace (*arriba*); Nigel Brothers *Parks and Wildlife Service, Tasmania* (*abajo derecha*)
11	Kaku Kurita, *Gamma Liaison*
12-13	David W. Harp
14	Laurie Grace
17	Abraham Menashe
18	Roberto Osti
19	Carey Ballard (*arriba*); Roberto Osti (*abajo*)
20-21	Roberto Osti
22	Tony Brain, *Science Photo Library* (*arriba*); David M. Phillips, *Population Council, Science Source* (*abajo*)
26-27	Grabado de J. Carter; delineado por Edward Cresy y George L. Taylor
28-29	Tomo Narashima (*arriba*); Grabado de J. Carter; delineado por Edward Cresy y George L. Taylor (*abajo*)
30	Tomo Narashima
31	Philip Vanoutrive *SIPA* (*arriba*); Massimo Sestini, *Gamma Liaison* (*centro dcha. y abajo*); Gianni Giansanti, *Sygma* (*centro izda.*)
44-45	Barry Ross
46-47	Princeton University Press (*izda.*); *Sydney Magazine of Science and Art* (*centro*); University of Wisconsin Press (*dcha.*)
48	Johnny Johnson (*arriba*); Richard Megna (*abajo*)
49	Barry Ross
50-51	Dana Burns-Pizer
53	Dana Burns-Pizer; fuente: Jiri Mestecky
55-56	Michael Goodman
57	Skidata Computer (*arriba*); Michael Goodman (*abajo*)
58	Michael Goodman
60-61	Fotografía en blanco y negro de Dan Wagner; composición digital de Tom Draper Design
63	Universidad de Pittsburgh
66	Tom Draper Design
68-72	J. O. Tocho, L. Da Silva, G. Lifante, F. Cusso y F. Jaque
74-75	Patricia J. Wynne
76-77	Jared Schneidman/JSD (*izda.*); William P. Jacobs (*dcha.*)
78	Jared Schneidman
79	Diane S. Littler
84-85	Michael Goodman
87	Andrew Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Las pesquerías mundiales, en peligro*; Esteban Santiago: *Fibrosis quística* y *Así protege la leche de la madre al recién nacido*; Nicolás García Tapia: *La torre inclinada de Pisa*; Montserrat Domingo: *Los dedos de sal del océano*; Juan Pedro Campos: *El problema de la consciencia*; Luis Bou: *Comunicación confidencial en Internet, Juegos matemáticos* y *Ensayo*; Conxi Rodríguez-Prieto y Enric Ballesteros: *Caulerpa*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Palacios: *Taller y laboratorio*

Ciencia y sociedad: J. M. García de la Mora

Ciencia y empresa: Luis Bou

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada


ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «No importa que se desee extraer mucha o poca energía de la fisión del uranio, hay que emplear siempre el mínimo irreducible de U-235. Una fuente de energía de tal naturaleza será pesada y poco manejable, y muy peligrosa en caso de ciertas clases de accidente. Estos aspectos descartan por sí mismos las ilusiones anteriores a la guerra acerca de automóviles equipados con fuentes de energía inagotables. Además, por lo que se refiere al recurso a la fisión del uranio, hay que abandonar también las utopías de generadores atómicos individuales para casas o explotaciones agropecuarias.»

«El grado de crecimiento en la producción industrial de aminoácidos se evidencia cuando nos percatamos de que diez años atrás no existía tal comercio. Durante los últimos dos o tres meses se han enviado por avión a Europa toneladas de estas vivificantes sustancias para contribuir a restaurar la salud de los hambrientos habitantes de los países devastados por la guerra. Al igual que las sulfamidas, las vitaminas y la penicilina han superado ya la fase del tubo de ensayo, los aminoácidos han progresado mucho más allá de la etapa de laboratorio.»

«Quienes siguen desconfiando de las resinas sintéticas como adhesivos fiables para la madera encontrarán respuestas a muchas de sus preguntas en los trabajos que se están realizando en el hidroavión de 200 toneladas ya casi terminado por la Hughes Aircraft Company. En él se está empleando adhesivos (líquidos y laminares) para ejecutar los millones de uniones encoladas necesarias en esta gigantesca aeronave. Los ensayos realizados a lo largo de tres años han demostrado la eficacia de los materiales adhesivos.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un enorme aerolito, o meteorito, estalló sobre la ciudad de Madrid (España) a las nueve y media de la mañana del diez de febrero. La explosión estuvo acompañada de un vívido destello luminoso y un fuerte estampido. La conmoción fue tan intensa, que el tabique medianero del edificio de la legación estadounidense se vino abajo y se rompieron casi todas sus ventanas. Funcionarios del Observatorio de Madrid afirman que la explosión tuvo lugar a más de treinta kilómetros de la superficie terrestre. En la ciudad reinó un pánico general.»

«De la Compañía Ferroviaria de Londres y el Noroeste, de Inglaterra, se dice que es la mayor empresa del mundo. Posee 2300 máquinas y da empleo a 60.000 personas. Ella misma se lo hace todo, puentes, máquinas, raíles, coches y una incontable serie de otras cosas, incluidos los cubos para el carbón y los brazos y piernas de palo para el personal lesionado.»

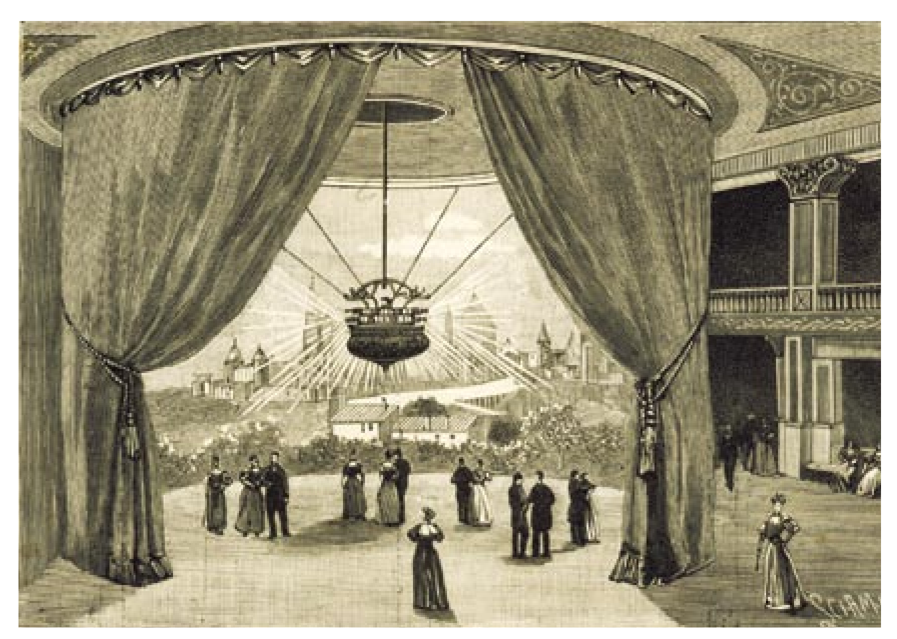
«Amberes rivaliza con Londres en el comercio mundial del marfil. El cónsul general británico en Amberes informa de las grandes cantidades de marfil que a Bélgica se envían desde el Congo.»

«En nuestra ilustración ofrecemos una vista general del ciclorama, o panorama eléctrico según la concepción de su inventor, el señor Chase, de Chicago. El aparato proyector, suspendido del techo mediante un tubo de acero y cables tirantes del mismo metal, tiene unos dos metros y medio de diámetro. En su interior se alberga el operador rodeado de una mesa anular en la que descansan ocho proyectores dobles, linternas y todo el instrumental necesario para dotar de vida a un panorama de casi cien metros de perímetro por diez de altura. A voluntad es posible animar una parte u otra de la imagen combinando el aparato con el kinetoscopio de Edison o el kinematógrafo de Lumière.»

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un tal señor Phillips, de Londres, ha presentado un aparato para extinguir fuegos instantáneamente. El fundamento de este aniquilador del fuego es que lanza sobre las llamas un vapor gaseoso que posee una mayor afinidad con el oxígeno que los combustibles en combustión y, por tanto, extingue el fuego privándolo del oxígeno, elemento éste del que especialmente depende la combustión.»

«Una obra excelente recién aparecida, "El Arte de la Tejeduría", de C. G. Gilroy, presenta un telar francés asaz complicado, o tal como en ella se califica, una máquina Jacquard. Es esta máquina capaz de trabajar sobre una ilimitada variedad de dibujos y colores.»



Una idea para cinema a 360 grados, de 1896

Cartas

Ciencia en España

En el número de diciembre de 1995 de *Investigación y Ciencia* (págs. 74-75), se publica un "Apunte bibliométrico para España", firmado por Angel Pestaña, cuyo contenido se puede resumir en los siguientes puntos: 1) España ha aumentado notablemente su cuota de participación en las publicaciones científicas internacionales; 2) sin embargo, el impacto observado (citas recibidas) de las contribuciones de autores españoles es mucho menor que el esperado (calculado a partir del impacto medio de las revistas en las que se publican esas contribuciones), lo que hace que el indicador de impacto relativo (impacto observado dividido por impacto esperado) haga descender a España al puesto 38 en el correspondiente ranking con datos referidos a 1985-89, lo que supone además un empeoramiento de su situación respecto a los datos de 1981-84; 3) esto indica, según la interpretación de Pestaña, que "el aumento espectacular en el número de publicaciones internacionales de procedencia española no se ha acompañado de un aumento correspondiente en su visibilidad e impacto. A este resultado ha podido contribuir una *disminución real de la calidad intrínseca* de las publicaciones..." (el subrayado es nuestro).

La valoración de Pestaña, seguramente por limitaciones de espacio, resulta imprecisa y ambigua. Pero además tiene algunos defectos que consideramos necesario señalar: utiliza datos inadecuados para hacer una valoración de la calidad de la producción científica, interpreta inadecuadamente los datos que utiliza e ignora otros datos más significativos que se pueden extraer de las mismas fuentes que él ha utilizado.

En efecto, lo que el autor denomina factor de impacto relativo es un mal indicador de calidad científica: un artículo que recibiera sólo una cita, pero que hubiera sido publicado en una revista cuyos artículos han recibido como media 0,20 citas, tendría un factor de impacto relativo igual a 5, mucho más alto que el más alto alcanzado por la producción científica de cualquier país con una presencia significativa en el SCI. En realidad, el llamado factor de impacto relativo mide la relación entre la visibilidad o impacto observado de un artículo científico y la visibilidad o impacto del total de artículos publicados en la misma revista. Tomando ciertas precauciones bien conocidas por los especialistas, en las que no vamos a detenernos ahora, se puede estimar que la calidad de la producción científica de un país está mejorando bien sea porque aumenta su participación en las revistas de mayor impacto (que generalmente son las que imponen controles más rigurosos para aceptar una contribución), bien sea porque aumenta el número de citas efectivamente recibidas. Pero es absurdo interpretar que si aumenta más la primera magnitud (factor de impacto) que la segunda (citas recibidas), es que puede estar produciéndose un descenso en la calidad intrínseca de las publicaciones. Es como si pensáramos que un hombre rico se hace pobre cuando cambia su residencia a un barrio cuyos vecinos son más ricos que los que tenía antes.

Por lo demás, el lector del breve "Apunte bibliométrico" de Pestaña habría podido apreciar mejor el verdadero alcance de la valoración negativa de la calidad de la producción científica española que hace el autor si éste hubiera aclarado que el ranking de impacto relativo en el que España ocupa el lugar 38 durante el período 1985-89 está encabezado, justamente en esos años, por potencias científicas mundiales del calibre de Ruanda y el Congo.

MIGUEL A. QUINTANILLA
Y BRUNO MALTRÁS
Universidad de Salamanca

Angel Pestaña replica:

Agradezco la atención prestada por Miguel A. Quintanilla y Bruno Maltrás a mi "Apunte bibliométrico para España". No considero, sin embargo, de recibo su modo de proceder, que toma como punto de partida de su carta una mutilación de la frase final de mi escrito. Esto les permite a Quintanilla y Maltrás dedicar un florilegio de descalificaciones —imprecisión, ambigüedad e, incluso, manipulación ignorante de las fuentes documentales— a unas apreciaciones mías, que han sido previamente descontextualizadas y reducidas a una sola dimensión por su propia intervención.

Dejando a un lado estos modales, que estoy dispuesto a considerar como un recurso dialéctico para situarse en posiciones de ventaja en la disputa, lo que queda es una forma distinta —y complementaria— de valorar nuestro sistema de ciencia y tecnología mediante el uso de los indicadores bibliométricos. Quintanilla y Maltrás hacen énfasis en el crecimiento relativo, mientras que el que suscribe utiliza la foto fija para enfatizar el camino a recorrer. Para que el amable lector entienda, lo que está en juego en esta disputa es similar a la distinta valoración, oficiosa o crítica, de los indicadores económicos en relación a los objetivos de Maastrich; aquélla hace énfasis triunfalista en el camino recorrido, ésta señala "aviesamente" los problemas a superar.

Las pesquerías mundiales, en peligro

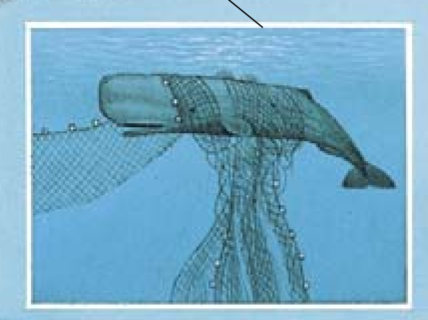
Las especies marinas no pueden resistir el acoso de la pesca industrial moderna. El colapso de los caladeros en muchas regiones demuestra a las claras la gravedad del peligro

Carl Safina

Casi nadie ignora que Jean-Baptiste de Lamarck fue el padre de la teoría de la herencia de los caracteres adquiridos. Pero muy pocos han oído hablar de sus opiniones sobre pesquerías marinas. Reflexionando sobre el tema, escribió: “Los animales que viven... en el mar... están protegidos de la destrucción humana de sus especies. Su multiplicación es tan rápida y tan grandes sus medios para evadir la persecución o las trampas, que no existe la menor probabilidad de que el hombre pueda acabar con toda una especie de ninguno de estos animales.” Lamarck erró también en su teoría de la evolución.

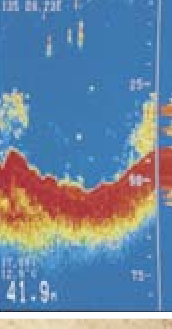
Se le puede perdonar a ese naturalista que vivió a caballo de los siglos XVIII y XIX su incapacidad para imaginar que los humanos llegarían a capturar peces con una celeridad mayor que el ritmo de reproducción de tales animales. Menos excusable es que muchas personas (entre ellas las dedi-

REDES DE DERIVA LARGAS; aunque prohibidas, se siguen usando. Enmallan a una infinidad de animales, además de los que se pretende capturar



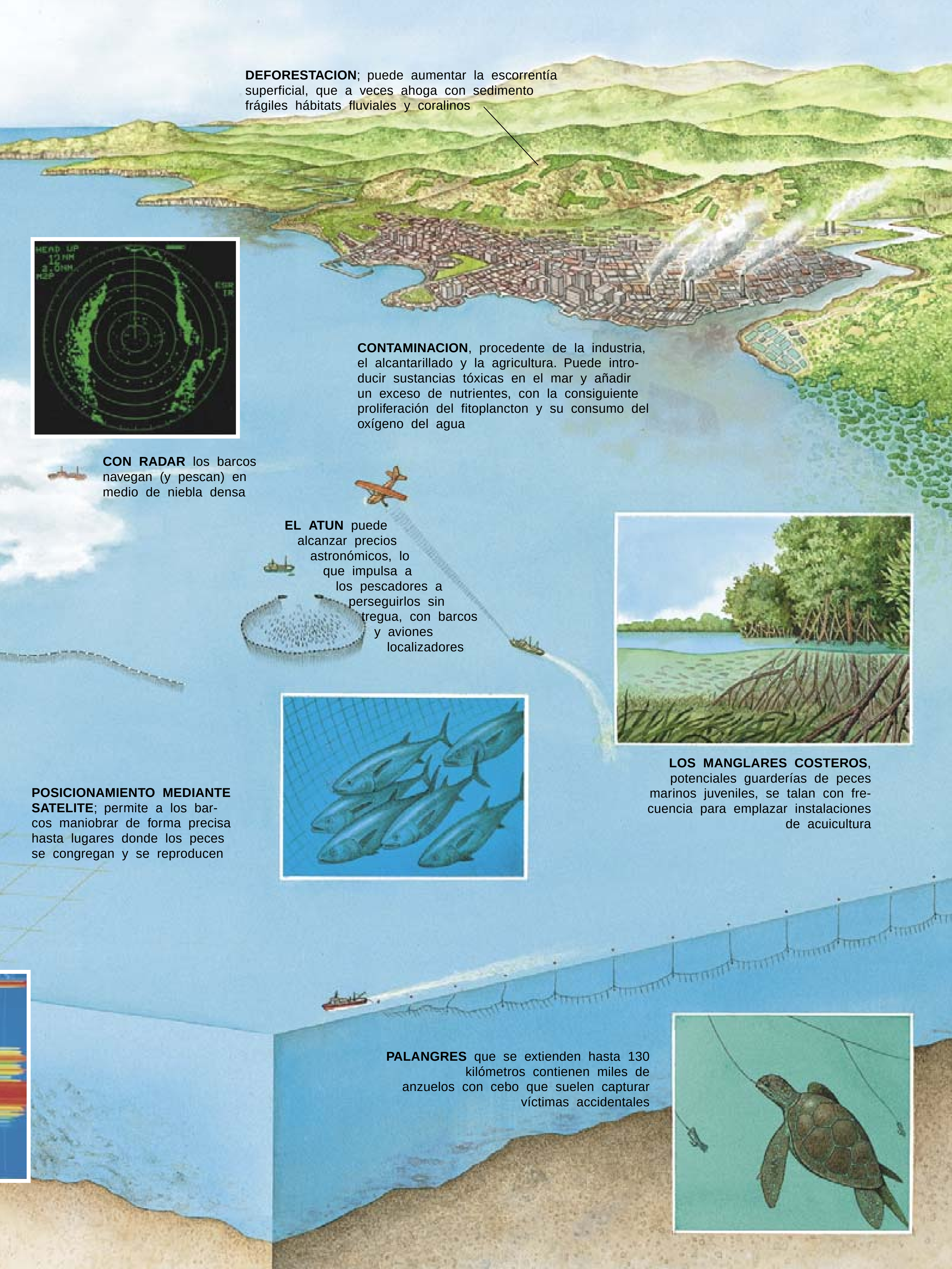
PAREJA DE ARRASTREROS; están prohibidas en algunos lugares porque se trata de un sistema de pesca excesivamente drástico





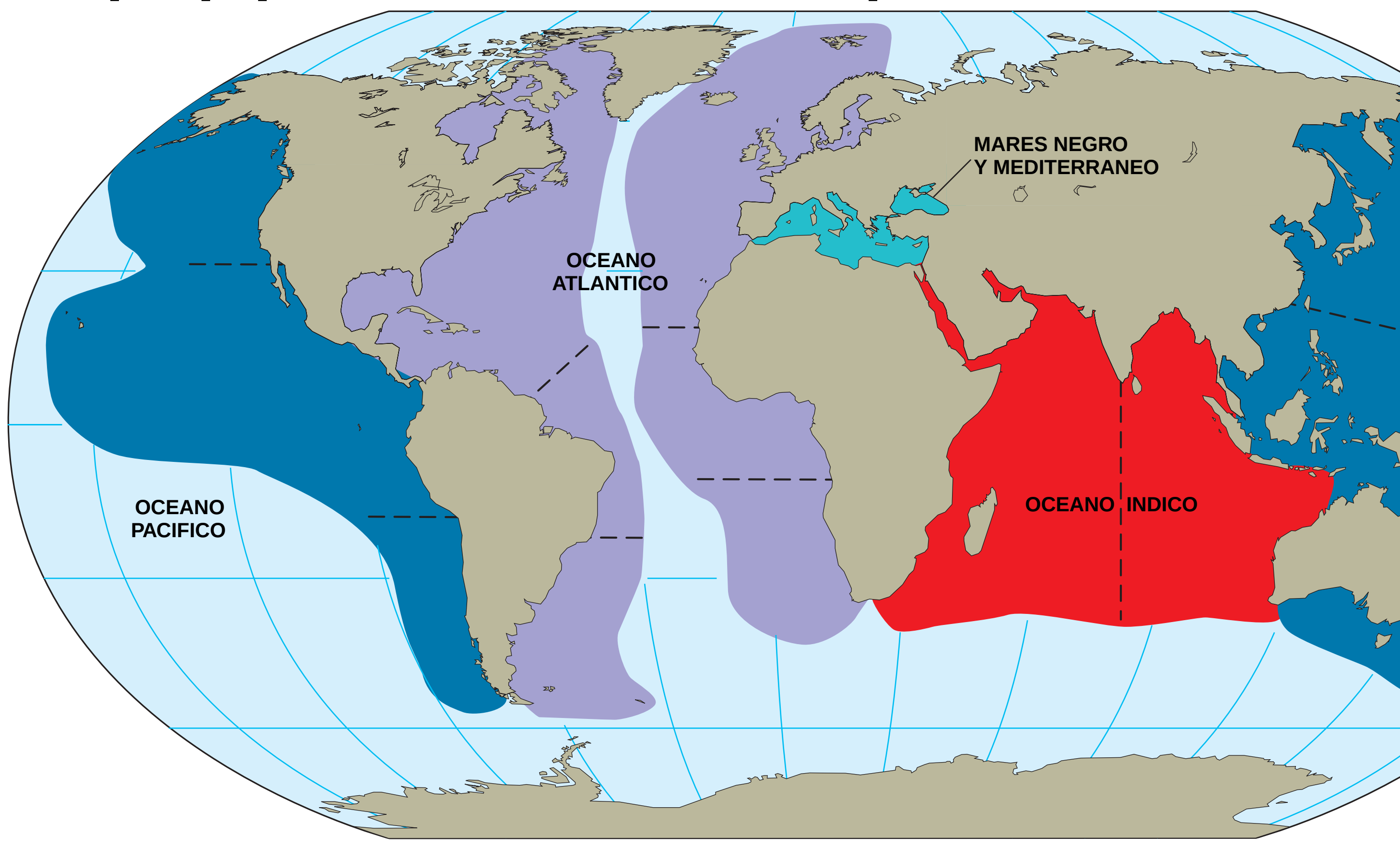
SONAR para detectar directamente los cardúmenes por sus ecos característicos

1. LOS PECES MARINOS se enfrentan a múltiples amenazas derivadas de la explotación excesiva que sobre ellos ejercen las modernas flotas pesqueras y la degradación de sus hábitats naturales.



DEFORESTACION; puede aumentar la escorrentía superficial, que a veces ahoga con sedimento frágiles hábitats fluviales y coralinos
CONTAMINACION, procedente de la industria, el alcantarillado y la agricultura. Puede introducir sustancias tóxicas en el mar y añadir un exceso de nutrientes, con la consiguiente proliferación del fitoplancton y su consumo del oxígeno del agua
CON RADAR los barcos navegan (y pescan) en medio de niebla densa
EL ATUN puede alcanzar precios astronómicos, lo que impulsa a los pescadores a perseguirlos sin tregua, con barcos y aviones localizadores
LOS MANGLARES COSTEROS, potenciales guarderías de peces marinos juveniles, se talan con frecuencia para emplazar instalaciones de acuicultura
POSICIONAMIENTO MEDIANTE SATELITE; permite a los barcos maniobrar de forma precisa hasta lugares donde los peces se congregan y se reproducen
PALANGRES que se extienden hasta 130 kilómetros contienen miles de anzuelos con cebo que suelen capturar víctimas accidentales

Principales pesquerías del mundo: Evolución de las capturas



cadas por profesión a las pesquerías) hayan cometido el mismo error de apreciación. Por culpa de sus fallos, numerosas poblaciones de peces han caído hasta niveles bajísimos, se han desestabilizado ecosistemas marinos y se han empobrecido muchas comunidades costeras. No deja de resultar sarcástico que el afán por obtener beneficios a corto plazo haya costado billones de pesetas a empresas y contribuyentes, y haya amenazado la seguridad alimentaria de los países en vías de desarrollo de todo el mundo. La insensatez fundamental que subyace bajo la actual disminución de los recursos pesqueros debe atribuirse a una incapacidad general a la hora de reconocer que los peces son animales salvajes, los únicos que todavía se cazan a gran escala.

Puesto que las especies salvajes se regeneran a ritmos determinados por la naturaleza, llegará un momento en que los esfuerzos empeñados por aumentar su presencia en los mercados habrán de tener un tope. Esa línea parece haberse ya saltado en todas las regiones del Atlántico, del Mediterráneo y del Pacífico: todas y cada una de estas áreas presentan capturas menguantes. A escala mundial, la extracción de peces salvajes alcanzó su máximo de 82 millones de toneladas en 1989. Desde entonces, se ha sustituido la tendencia de crecimiento a largo plazo por el estancamiento o el declive.

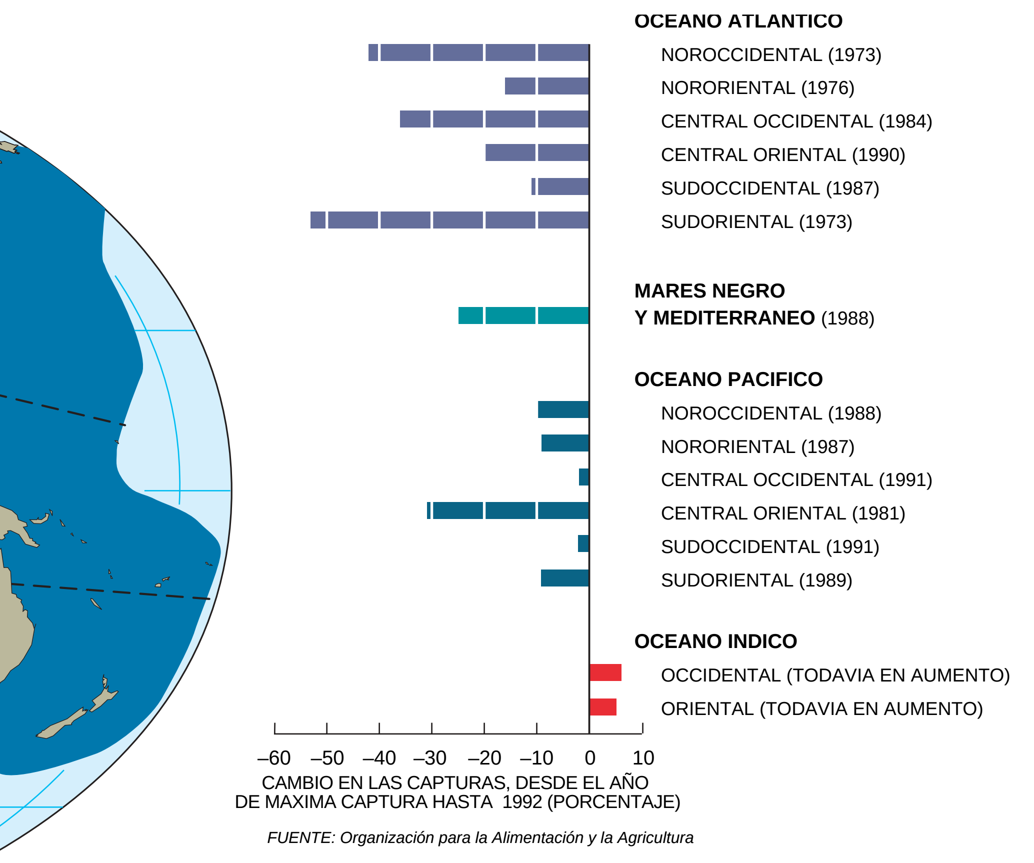
En algunas áreas en las que las capturas alcanzaron un máximo ya en los años setenta, los desembarcos actuales han bajado más de un 50 por ciento. Y lo que es más preocupante, algunos de los mayores caladeros de pesca del mundo, entre ellos los Grandes Bancos y el Banco Georges, del este de Norteamérica, se hallan cerrados tras su agostamiento; la fauna antaño dominante se ha visto reducida a una ínfima fracción de cuanto encerraba. Puede afirmarse que esos caladeros están extinguidos para la explotación comercial.

Consciente del cambio fundamental operado, la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas (entidad que diez años atrás todavía alentaba la expansión de la pesca industrial a gran escala) ha llegado a la conclusión de que no puede mantenerse el sistema de explotación de las pesquerías del mundo. Reconoce que se ha hecho un grave daño al ambiente marino y a las muchas economías que dependen de este recurso natural.

Tan severas afirmaciones las repite, en los Estados Unidos, la Academia Nacional de Ciencias. En abril de 1995 recordaba que, por culpa del hombre, muchas de las especies comestibles preferidas habían sufrido una drástica reducción; más: los cambios inducidos en la composición y la abundancia de animales y plantas marinos eran de tal calibre que corría peligro el funcionamiento de los ecosistemas marinos. Aunque el estudio advertía que la pesca era sólo una de las muchas actividades humanas que amenazaban los océanos, la consideraba la más grave.

La verdad es que los problemas ambientales que gravitan sobre los

CARL SAFINA se doctoró en ecología en 1987 por la Universidad de Rutgers, donde estudió dinámica de poblaciones naturales en aves marinas, peces presa y peces depredadores. Además de fundar el Programa Océanos Vivos de la Sociedad Nacional Audubon, que ahora dirige, se ha dedicado a la pesca comercial y deportiva. Ha recibido el premio que el Fondo Benéfico Pew concede a expertos en conservación y ambiente.



2. LAS CAPTURAS PESQUERAS por regiones se han reducido en la mayoría de las áreas del planeta, después de haber alcanzado sus valores máximos hace poco tiempo, entre cuatro y 22 años. (El año de la máxima captura se indica entre paréntesis.) Sólo en el océano Indico, donde la pesca industrial apenas acaba de empezar, las capturas marinas han seguido aumentando. (Las barras rojas muestran el crecimiento medio anual desde 1988.)

mares son, en determinados aspectos, más acuciantes que los que se conocen en los continentes. Daniel Pauly, del Centro de Pesquerías de la Universidad de la Columbia Británica, y Villy Christensen, del Centro Internacional para la Gestión de Recursos Acuáticos Vivos, de Manila, han señalado que la pesca ha esquilmado la mayoría de las plataformas continentales someras, mientras que todavía existen grandes segmentos de pluviselva vírgenes. Para los que trabajan en recursos marinos, no se trata de un daño irrelevante. “Hasta el más necio sabe que no quedan peces”, afirma rotundo Vaughn C. Anthony, antaño adscrito al Servicio Nacional de Pesquerías Marinas.

¿Cómo se llegó a tamaño desastre? Durante los años cincuenta y sesenta se produjo una explosión de técnicas pesqueras. Se adaptaron algunas militares para las faenas de alta mar. El radar permitía a los barcos navegar entre niebla espesa; gracias al sonar, se detectaban los cardúmenes sitos a gran profundidad bajo la opaca sábana del mar. Medios electrónicos puestos al servicio de la navegación, como el LORAN (Navegación a Gran Distancia), y sistemas de posicionamiento mediante satélite transformaron un mar sin caminos en una retícula; los barcos podían así retornar, dentro de un margen de error de 15 metros, al punto deseado: los lugares donde los peces se congregan y crían. Los barcos reciben, por vía satélite, mapas de los frentes térmicos del agua, que les sirven de orientación para saber por dónde se desplazarán los peces. Algunos barcos faenan auxiliados por aviones que les señalan la formación de bancos.

Muchas unidades de la flota pesquera son verdaderas fábricas flotantes. Manejan artes de vastísimas proporciones: palangres de 130 kilómetros de longitud sumergidos con miles de anzuelos cebados, redes de arrastre en forma de saco con capacidad para tragarse el equivalente a 12 aviones de la clase jumbo, y redes de deriva de 65 kilómetros de largo, empleadas todavía por algunos países. La presión que ejerce la pesca industrial es tan intensa, que cada año se extrae del 80 al 90 por ciento de los peces de algunas poblaciones.

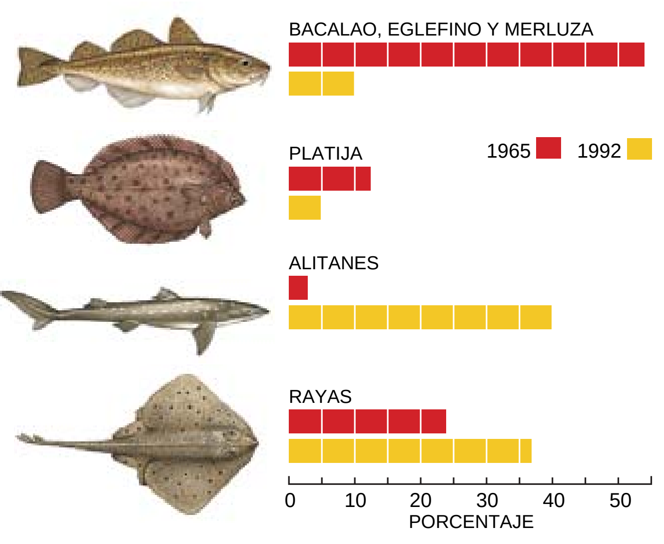
Así, a lo largo de los últimos 20 años, la industria pesquera ha tenido que habérselas, de forma creciente, con el problema consiguiente, a saber, que la tasa de pesca iba por delante de la capacidad reproductora de las



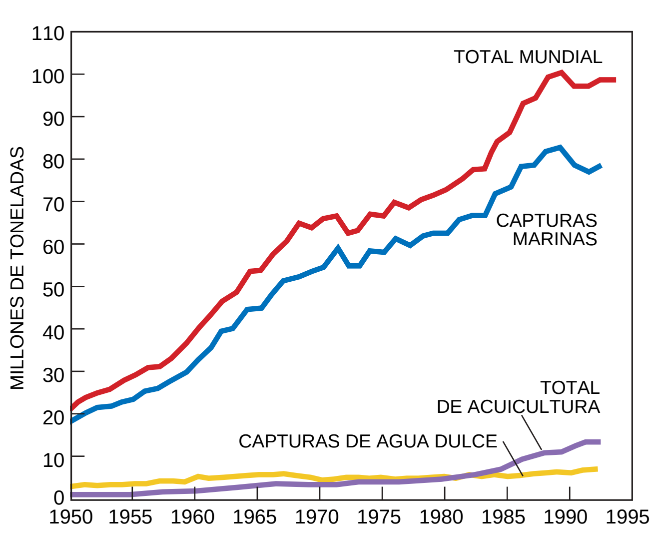
3. LOS ALBATROS mueren en número muy elevado porque con frecuencia tratan de cobrar el cebo de los palangres atuneros. Tales pérdidas amenazan la supervivencia de varias especies de estas aves marinas de amplia distribución.

especies. Para contrarrestar las pérdidas de especies demandadas, los pescadores han ido cambiando hacia otras de menor valor, que por lo general se encuentran a un nivel inferior de la red trófica. Pero esta práctica sustrae alimento a peces mayores, mamíferos y aves marinas. Durante los años ochenta, cinco de las especies del grupo menos demandado constituyeron ya cerca del 30 por ciento de la captura pesquera mundial, pero supusieron sólo el 6 por ciento de su valor monetario. Hoy, apenas quedan otras especies que admitan una explotación comercial.

Con la caída de las especies antaño demandadas, algunas empresas han optado por la acuicultura para compensar el déficit. La cría artificial ha duplicado su producción en los últimos diez años, aumentando en cerca de 10 millones de toneladas desde 1985. En el mercado hay ahora más peces de agua dulce procedentes de granjas que de pesquerías naturales. La cría de salmones marinos en granjas también rivaliza con su pesca; cerca de la mitad de los camarones que se venden hoy se crían en estanques. En su conjunto, la acuicultura proporciona la quinta parte del pescado consumido.



4. ABUNDANCIA RELATIVA de peces comunes en el golfo de Maine; ha cambiado de forma drástica debido a la sobrepesca. Los histogramas indican el nivel de cada una de estas especies en 1965 (*rojo*), en comparación con 1992 (*amarillo*).



5. LA PRODUCCION DE PECES procedentes de acuicultura continúa aumentando, pero la de pesquerías marinas (que proporcionan la mayor parte de la producción total) alcanzó un máximo en 1989. Desde entonces la captura mundial total ha entrado en un período de estancamiento o caída.

Contra lo que cupiera esperar, el desarrollo de la acuicultura no ha relajado la presión sobre las poblaciones naturales. Peor todavía, puede incrementarla. Las granjas de camarones han creado una demanda de capturas que no tienen más sentido que el de alimentarlos; se trata de la novedosa pesca de biomasa. En efecto, los acuicultores camaroneros de ciertos países están invirtiendo ahora en redes de arrastre de malla fina para capturar todo lo que pueden como alimento para los camarones. Buena parte de esta pesca de biomasa está constituida por juveniles de especies valiosas, es decir, antes de que lleguen a la madurez reproductora.

Las granjas de peces pueden también dañar a las poblaciones naturales porque la construcción de rediles a lo largo de la costa suele requerir la tala de manglares; las raíces sumergidas de estos árboles tolerantes de la sal proporcionan una guardería natural para camarones y peces. Según estudio de Peter Weber, del Instituto Worldwatch, la acuicultura es una de las principales razones de la destrucción de la mitad de los manglares del mundo. Además, la acuicultura constituye una amenaza contra los peces marinos porque algunos de sus productos más valiosos, como meros, canos o anguilas, no pueden reproducirse en cautividad y se crían a partir de peces acabados de salir del huevo que se capturan en la naturaleza: la captura incesante de alevines diezma todavía más las poblaciones de estas especies.

Por otro lado, la acuicultura resulta ser un mal sustituto de la pesca: exige una inversión importante, espacio y gran cantidad de agua limpia. La mayoría de los habitantes de las costas superpobladas del planeta carecen de tales recursos. Tal como se lleva a cabo en muchas naciones del Tercer Mundo, la acuicultura suele limitarse a camarones y especies caras de peces para su exportación a países más ricos, mientras que los lugareños han de subvenir a sus propias necesidades con los recursos menguantes del mar.

Si tan alarmante es la situación, ¿por qué no falta el pescado en la plaza y a un precio, en general, asequible? Aunque el pescado y el marisco han subido más deprisa que la carne de pollo, de porcino o de vacuno, el coste inferior de éstos tiende a refrenar el precio de aquéllos. Si su compra resultara prohibitiva, el consumidor acabaría por optar por otros alimentos. Otros factores ayudan a frenar la subida: importación, sobrepesca para mantener un suministro elevado (hasta que las pesquerías se derrumben) y acuicultura. A propósito de esta última, es sabido que la construcción de granjas camaroneras que siguió a la reducción de muchas poblaciones naturales permitió mantener los precios.

Así, hasta cierto punto, la ley económica de la oferta y la demanda controla el coste del pescado. Pero ninguna ley dice que las pesquerías deban dar beneficios. Para capturar 90 billones de pesetas en pescado, el sector se gastó 160 billones de pesetas anuales; los 70 billones de déficit se cubrieron en buena parte con subsidios y subvenciones: exenciones en los impuestos de los combustibles, control de precios, préstamos a bajo interés y subvenciones directas para aparejos o infraestructura. Ayudas gu-

En ningún sitio como en casa

Aunque mi investigación se ha centrado sobre todo en la sobrepesca, he podido observar la degradación y destrucción que padecen, de múltiples maneras, los hábitats marinos. En muchas regiones templadas, animales de gran talla y plantas bentónicos (de fondo, que sirven de comida y refugio para los peces) han sufrido el gravísimo daño que inflige el arrastre, una forma de pesca que arrastra redes sobre las plataformas continentales someras. En el Indopacífico tropical, muchos pescadores locales capturan peces aturdiéndolos con cianuro, un veneno que mata los corales que constituyen su hábitat. Algunos pescadores conducen las presas hasta las redes golpeando los corales con piedras; la embarcación que practique ese sistema puede destruir diariamente hasta un kilómetro cuadrado de arrecife vivo.

Los hábitats marinos sufren también las agresiones de la acuicultura, la agricultura y las talas madereras. En el Pacífico noroccidental de los Estados Unidos y Canadá, la deforestación generalizada, las presas hidroeléctricas y la desviación de los cursos de agua han arruinado miles de kilómetros de hábitats de salmones. Por esa misma causa se hallan en peligro la mayoría de las especies de esturiones del hemisferio norte. La elevada sedimentación que sigue a la deforestación también degrada los hábitats en muchas partes de los trópicos. Los sedimentos pueden matar los arrecifes de coral al obstruirlos, bloquear la penetración de la luz solar y evitar el asentamiento de las larvas.

En 1989 Robert Johannes, ecólogo marino, participó en la denominación del minúsculo estado insular de Palau como una de las siete maravillas submarinas del mundo, comparable a las siete maravillas de la antigüedad; lo avalaban sus arrecifes de coral, espectaculares y muy poco alterados. Cuando le visité en Palau a principios de 1995, observé largas plumas de sedimento rojo que procedían de nuevas carreteras, mal construidas, y que penetraban en las lagunas coralinas después de lluvias intensas. La escorrentía de la jungla intacta, en cambio, era tan límpida como la propia lluvia. Aguas negras sin tratar fluían asimismo hacia el arrecife cerca del puerto de la capital. Esta contaminación rica en nutrientes permite que las algas crezcan a tasas anómalas, y mata los corales al alterar el delicado equilibrio con las algas simbiontes internas.

C. S.

bernamentales que se justifican por mor de la conservación de empleo, sin que parezca importar la autodestrucción de las pesquerías.

Durante muchos años, estos incentivos animaron a los inversores a financiar más barcos de pesca de los que podía admitir el mantenimiento de los recursos marinos. Entre 1970 y 1990, el sector pesquero dobló, en su expansión, la tasa de captura global. Se multiplicaron por dos, en efecto, el tonelaje total de barcos y su número. Se llegó al punto en que la flota industrial alcanzó el doble de la capacidad necesaria para extraer lo que los océanos pueden producir y renovar. Economistas y armadores califican la situación de "capitalización excesiva". No deja de resultar llamativo que podría haberse recogido lo mismo sin botar ningún barco nuevo. Según cierto estudio relativo a los Estados Unidos, los beneficios anuales de la pesquería de un pez plano, la lengua coliamarilla, podrían aumentar de 0 a 700 millones de pesetas si se eliminaran más de 100 barcas de pesca.

Con semejante capacidad, la pesca disponible cae vertiginosamente. Los beneficios, en consecuencia, se desploman y se deprecian los barcos en el mercado. Ante la imposibilidad de vender su principal inversión sin grandes pérdidas financieras, los propietarios de los barcos se ven forzados a seguir faenando para pagar sus préstamos. Atrapados en esa trampa económica, presionan ante las administraciones públicas para que no se recorten los ingresos permisibles. Se trata de un proceso generalizado y que hoy nadie discute. Las mismas Naciones Unidas han terminado por reconocer que, por culpa de haber fomentado el desarrollo del sector, los niveles elevados



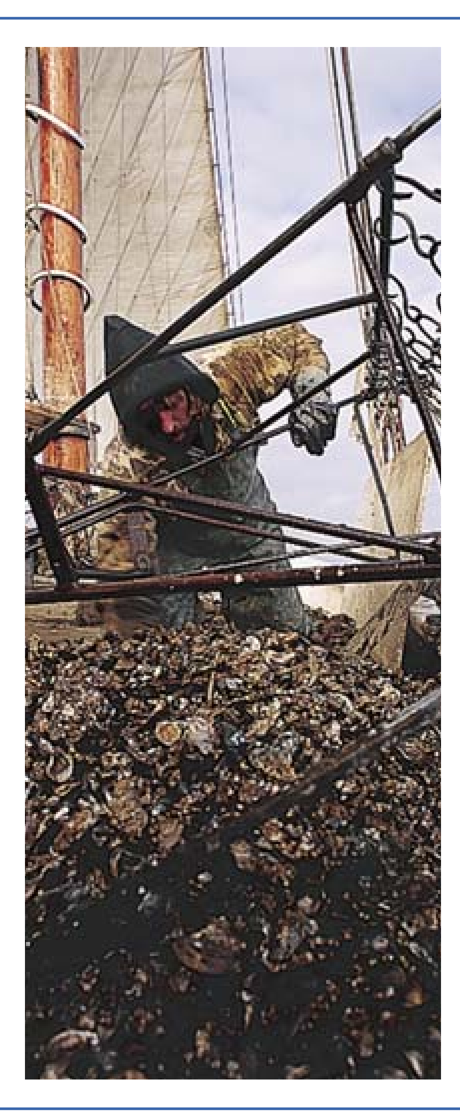
6. LA CARNE DE BALLENA que se vende en Japón incluye muchas especies diferentes procedentes de todo el mundo, aunque la captura legal (que oficialmente se obtiene con fines científicos) se halla limitada a los rorcuales aliblancos.

Economía de escala

Aunque en la economía mundial la pesca representa sólo el 1 por ciento aproximadamente, considerada desde una óptica regional contribuye muchísimo a la supervivencia humana. La fracción que las pesquerías marinas aportan al suministro mundial de proteínas supera la de origen vacuno, aviar o cualquier otra fuente animal.

La pesca no requiere poseer tierras. Puesto que se trata de una actividad abierta a todo el mundo, suele aparecer como último recurso laboral de las naciones en vías de desarrollo: una ocupación cuando no existen otras opciones. En el planeta, unos 200 millones de personas dependen de la pesca para su subsistencia. Sólo en el Sudeste asiático, hay más de cinco millones que la tienen por profesión. En el norte de Chile el 40 por ciento de la población vive del océano. En Terranova la mayoría de los empleos procedían de la pesca o de empresas auxiliares de la misma hasta que el derrumbe de las pesquerías de bacalao a comienzo de los años noventa dejó en el paro a decenas de miles de personas.

No es infrecuente que los debates sobre la conservación de los recursos naturales se planteen en términos de intereses contrapuestos entre empleo y ambiente. Con todo, el restablecimiento de las poblaciones marinas aliviaría la tasa de paro. Según estudios de Michael P. Sissenwine y Andrew A. Rosenberg, del Servicio Nacional de Pesquerías Marinas de los Estados Unidos, la recuperación del potencial a largo plazo de especies hoy sobreexplotadas permitiría, a través del aprovechamiento racional de las mismas, sumar alrededor de 1 billón de pesetas al producto interior bruto de los Estados Unidos, amén de crear unos 300.000 empleos. En efecto, si se restablecieran las poblaciones y se gestionaran adecuadamente, podrían pescarse 20 millones de toneladas anuales más, a escala global. Ahora bien, la reinstauración del equilibrio ecológico, el beneficio fiscal y la seguridad económica requerirán un recorte sustancial de la fuerza pesquera, al objeto de que puedan recuperarse las diezmadas poblaciones naturales.





de subsidios desembocan en graves penurias económicas y ambientales.

Mientras el volumen de pesca decae, los habitantes del planeta aumentan cada año en unos 100 millones, cifra igual a la población actual de México. Mantener la tasa actual de consumo con este crecimiento demográfico exigirá que hacia el año 2010 pueda disponerse cada año de unos 19 millones de toneladas más de pescado. Para conseguir ese nivel, la acuicultura tendrá que duplicar su producción en los próximos 15 años, y deberán restaurarse las poblaciones naturales de peces para permitir capturas superiores sin alterar su composición.

Las innovaciones técnicas podrían también aplicarse a la producción de alimento humano a partir de especies que hoy se destinan a piensos. Ahora bien, aun cuando todos los peces que ahora sirven de alimento animal (un tercio de la captura mundial) los aprovecháramos para nuestra propia dieta, el consumo medio actual sólo podría durar unos 20 años. Transcurrido ese intervalo, ni siquiera la mejora en la conservación de las poblaciones salvajes de peces podrá mantener el ritmo del crecimiento de la población humana. Quiere ello decir que el siglo que viene sufrirá el agotamiento de la capacidad natural del océano para satisfacer la demanda de la humanidad de alimento procedente del mar.

Para gestionar con criterio este recurso limitado habrá que apoyarse en sólidos conocimientos de biología y ecología marinas. Surgirán, qué duda cabe, dificultades importantes a la hora de transformar la información científica en políticas inteligentes y de traducir estas normativas a la práctica. Por experiencia sabemos que los gestores de las pesquerías y los políticos han dejado a un lado las numerosas evaluaciones, nacionales e internacionales, de poblaciones explotables que se han realizado en los últimos años.

No sólo eso. Cuando las administraciones han dictado normas limitantes, algunos armadores y cofradías no las han respetado. De 1986 a 1992, las flotas de altura que pescan en la parte internacional de los Grandes Bancos, en aguas de la costa de Canadá, extrajeron 16 veces los cupos correspondientes a bacalao, platija y gallineta que había establecido la Organización para las Pesquerías del Atlántico Noroccidental. Cuando funcionarios canadienses capturaron un barco de pesca español cerca de los Grandes Bancos a principios de 1995, encontraron dos diarios de navegación: en uno se registraban las operaciones reales y el otro estaba amañado para la inspección oficial. También descubrieron redes con mallas muy pequeñas, ilegales, y 350 toneladas de fletán negro. Ninguno de los peces hallados a bordo había llegado a la madurez sexual y, con



Esta obligada reducción del esfuerzo de pesca no tiene por qué hacerse a expensas de los trabajadores. Los gobiernos podrían aumentar el empleo y relajar la presión sobre las poblaciones de peces si no subvencionaran los barcos armados con todas las técnicas de punta. Por cada 125 millones de pesetas de inversión, las operaciones de pesca industrial requieren sólo de una a cinco personas, mientras que las pesquerías a pequeña escala podrían emplear de 60 a 3000. Por si fuera poco, la pesca industrial amenaza a decenas de millones de pescadores que faenan en barcos pequeños al esquilmar los peces de los que dependen para su subsistencia.

Para algunas pesquerías, las administraciones no han dudado en fomentar de intento la ineficacia con el propósito último de limitar las capturas excesivas y respetar los bancos. Por citar un ejemplo: en la bahía de Chesapeake, la ley exige que las barcas que dragan ostras funcionen a vela (*izquierda*), un freno contra la técnica que ha ayudado a salvar la pesquería. Y otro: en Nueva Inglaterra, la administración prohibió el uso de redes arrastradas entre dos barcas ("pareja de arrastreros"), habida cuenta del carácter expeditivo de dicha técnica para la pesca del bacalao. Por último: los gestores de la pesquería de atún de los Estados Unidos adjudican el 52 por ciento de la captura a las barcas comerciales que poseen los artes menos capaces (pincho o cañas y liñas), aunque toda la cantidad permitida se podría extraer fácilmente con redes arrastreras. En este postrer ejemplo, los barcos con los aparejos que requieren mayor número de brazos suponen cerca del 80 por ciento de los empleos directos; los que poseen grandes redes proporcionan sólo el 2 por ciento. Otras reglamentaciones sobre el tamaño y la cantidad total de las capturas, así como los cupos y el equipo permitido, constituyen el reconocimiento de que es necesario bajar el listón de la eficacia en aras de mayores beneficios sociales y ecológicos.

C. S.

ella, a la capacidad reproductora. Este incumplimiento de la normativa ha contribuido a la destrucción de la pesquería de los Grandes Bancos.

Por mucho que las Naciones Unidas denuncien que alrededor del 70 por ciento de los peces, crustáceos y moluscos comestibles de todo el mundo precisan con urgencia una gestión para su conservación, ningún país ha logrado administrar bien sus pesquerías. Más difícil resulta llegar a medidas de cooperación internacional. Si un país no está conforme con las restricciones de un determinado acuerdo, lo da por inexistente.

En 1991, por ejemplo, varias naciones acordaron reducir sus capturas de pez espada del Atlántico; España y los Estados Unidos cumplieron las limitaciones (que establecían cupos inferiores en un 15 por ciento a los niveles de 1988), pero la captura de Japón aumentó en un 70 por ciento, los desembarques de Portugal crecieron en un 120 por ciento y el diezmo de Canadá casi se triplicó. Noruega ha decidido unilateralmente reemprender la caza de rorcuales aliblancos, a pesar de una moratoria internacional. La caza de rorcuales aliblancos que hace el Japón, oficialmente con fines científicos, suministra carne que se vende como comida y mantiene un mercado que apoya en todo el mundo la caza ilegal de ballenas.

En todos los tipos de pesquerías, o en casi todos, se capturan involuntariamente formas de vida marina que reciben el nombre colectivo de descartes, o muertes accidentales. En las pesquerías comerciales, uno de cada cuatro animales que se extraen del mar no es deseado. Las piezas así cobradas se arrojan por la borda. En los descartes entran una gran variedad de organismos marinos: especies sin valor comercial y peces jóvenes, demasiado pequeños para su comercialización. En 1990 las redes de deriva de alta mar enmallaron 42 millones de animales cuya pesca no se buscaba directamente, entre ellos aves marinas buceadoras y mamíferos marinos. Para paliar estas pérdidas ingentes, las Naciones Unidas establecieron una prohibición global de las redes de deriva a gran escala (las de más de 2,5 kilómetros de longitud). Pese a la norma, Italia, Francia e Irlanda, entre otros países, continúan tendiéndolas.

En áreas costeras, las redes de pesca echadas cerca del fondo atrapan de forma rutinaria pequeños delfines. Las bajas que las pesquerías causan en diversas especies de mamíferos marinos (el baiji de Asia oriental, la vaquita mexicana —que es la especie más pequeña de delfín—, los delfines de Héctor en la región de Nueva Zelanda y la foca fraile del Mediterráneo) ponen en peligro la supervivencia de esos animales. También las aves marinas mueren cuando picotean el cebo de los palangres que se van soltando desde los barcos. Rosemary

Gales, del Servicio de Parques y Naturaleza de Hobarth en Tasmania, estima que en el hemisferio austral más de 40.000 albatros “muerden” los anzuelos y se ahogan cada año, atraídos por el cebo de calamar que se utiliza en los palangres atuneros. Con esta tasa de mortalidad se cierne el peligro de extinción sobre seis de las 14 especies de estas majestuosas aves marinas errantes.

En algunas pesquerías, los descartes superan a las capturas de especies buscadas. En 1992, en el mar de Bering los pescadores desecharon 16 millones de cangrejos reales rojos, y aprovecharon sólo unos tres millones. El arrastre dedicado a camarón y gamba produce más descartes que cualquier otro tipo de pesca y supone más de un tercio del total global. Los animales que se desechan superan a los camarones en un porcentaje que va del 125 al 830 por ciento. En la pesquería de camarón del golfo de México, se descartan anualmente 12 millones de pargos juveniles y 2800 toneladas de tiburones. En todo el mundo, se arrojan al mar unos seis millones de tiburones, la mitad de los capturados. Y es probable que estas estadísticas subestimen la magnitud del desperdicio: gran parte de los descartes ni se registran.

Hay, sin embargo, algunas señales para la esperanza. Las muertes accidentales de tortugas marinas en los arrastreros camaroneros había constituido un desastre permanente en aguas de los Estados Unidos (el Consejo de Investigación Nacional estimaba que cada año morían así hasta 55.000 tortugas adultas). Pero estas muertes se están reduciendo debido a unos “dispositivos de exclusión”, obligatorios desde hace poco, que desvían a estos reptiles hacia un escotillón por donde pueden escapar de las redes.

Quizás el ejemplo mejor conocido de muertes accidentales corresponde a los 400.000 delfines que acaban en los barcos que pescan al cerco atunes rabiles del Pacífico. A lo largo de tres décadas, desde que la industria atunera empezó a utilizar enormes redes de cerco, la población de delfín volteador oriental mermó en un 80 por ciento; el número de delfines moteados de alta mar cayó en más de un 50 por ciento. Para evitar esas matanzas, se idearon métodos calificados de seguros para los delfines (que empezaron a utilizarse en 1990), mediante los cuales los pescadores pasaron de tender el cerco alrededor de los bancos de delfines a hacerlo alrededor de maderos y otros objetos flotantes.

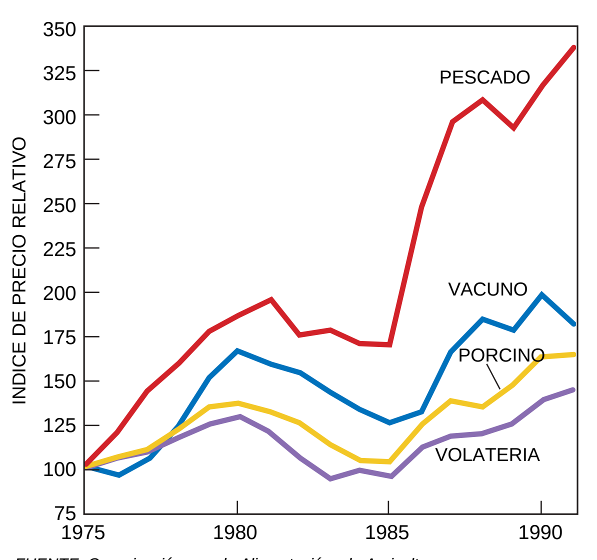
Se trata de un sistema que se ha visto coronado por el éxito. En efecto, las bajas de delfines se redujeron hasta que, en 1993, sólo hubo 4000. Pero los métodos de cerco, seguros para delfines, no sirven para los atunes inmaduros, los marlines o peces vela, las tortugas o los tiburones. Por término medio, por cada 1000 redes de cerco caladas alrededor de manadas de delfines, los pescadores capturan accidentalmente 500 delfines, 52 marlines, 10 tortugas marinas y ningún tiburón. En cambio, los descartes típicos del mismo número de caladas alrededor de objetos flotantes incluyen sólo dos delfines, pero también hay 654 peces vela, 102 tortugas marinas y 13.958 tiburones. Además, bajo los objetos flotantes se capturan muchos atunes juveniles.

Para evitar los descartes de la pesca atunera con red podría volverse al empleo de otros artes, como pértigas y sedales, según se practicaba comercialmente en los años cincuenta. Dicho cambio implicaría contratar tripulaciones más numerosas, del orden de las que se quedaron sin empleo cuando la pesquería empezó a mecanizar sus operaciones.

Las recientes reducciones en las muertes accidentales de delfines y tortugas nos indican que, pese a la precariedad de las pesquerías mundiales, hay también razones para el optimismo. Queda mucho por avanzar en la resolución de esos problemas, pero ya sabemos rectificar algunas dificultades. Sin duda, una de las principales medidas que podrían tomarse para evitar la sobrepesca y los descartes excesivos sería la de eliminar los subsidios para pesquerías financieramente ruinosas; éstas, que no podrían vivir de lo pescado, sí son capaces de esquilmar las especies.

Dondequiera que se han protegido los peces se ha comprobado que se ha recuperado su número y, con él, las actividades sociales y económicas que sustentaban. El resurgir de la lubina listada a lo largo de la costa oriental de los Estados Unidos es, probablemente, el mejor ejemplo de especie a la que se permitió recuperarse mediante una gestión inflexible y un inteligente plan de protección.

Desde 1994, las Naciones Unidas han venido promoviendo acuerdos proteccionistas de la pesca de altura. Con este impulso, de alcance histórico, sumado a los esfuerzos regionales y locales para proteger el ambiente marino, el mundo debería avanzar hacia un futuro sano y duradero de la vida en los océanos.



7. LOS PRECIOS DE EXPORTACION para el pescado han superado en un margen apreciable los del vacuno, el porcino y la volatería a lo largo de los últimos veinte años. Para facilitar la comparación, el precio de cada tipo de carne en 1975 se ha hecho igual a 100.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BLUEFIN TUNA IN THE WEST ATLANTIC: NEGLIGENT MANAGEMENT AND THE MAKING OF AN ENDANGERED SPECIES. Carl Safina en *Conservation Biology*, vol. 7, n.º 2, págs. 229-234; junio 1993.

GLOBAL MARINE BIOLOGICAL DIVERSITY: A STRATEGY FOR BUILDING CONSERVATION INTO DECISION MAKING. Dirigido por E. Norse. Island Press, 1993.

WHERE HAVE ALL THE FISHES GONE? Carl Safina en *Issues in Science and Technology*, vol. 10, págs. 37-43; primavera 1994.

THE STATE OF THE WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, 1995.

UNDERSTANDING MARINE BIODIVERSITY. Informe del Comité sobre Diversidad Biológica en Sistemas Marinos del Consejo Nacional de Investigación. National Academy Press, 1995.

Fibrosis quística

En la base de esta enfermedad letal, que se transmite por herencia, está la causa del malfuncionamiento de un canal clave para la célula a través del cual penetra o sale uno de los componentes de la sal común

Michael J. Welsh y Alan E. Smith

Pobre niño aquel que, al besarlo, su frente sabe a sal. Un embrujo pesa sobre él y no tardará en morir. Esta creencia de la cultura popular, arraigada en los países nórdicos de Europa, constituye una añeja referencia a la fibrosis quística, enfermedad frecuente y de origen genético. Como el dicho refleja, esta afección, que de manera irremisible llevaba al niño a una muerte prematura, se identificaba por el excesivo contenido de sal en el sudor. La frente salada es, sin embargo, una manifestación benigna, si tenemos en cuenta que esa anomalía hereditaria puede destruir los pulmones y producir graves alteraciones en el páncreas, intestino e hígado. Los avances en el tratamiento, conseguidos en años recientes, traen una nueva esperanza a los niños que sufren esta enfermedad congénita, amén de alargar la vida, en más de la mitad de los afectados, allende la veintena. Pero ninguno de los tratamientos aprobados alcanza todavía a corregir el trastorno bioquímico que subyace bajo la alteración genética implicada, ni a conjurar el espectro de una muerte precoz.

A principios de los años ochenta, y con la esperanza de mejorar los resultados, los investigadores se aprestaron a identificar la alteración genética responsable de la fibrosis quística. Después de más de un decenio de trabajo tenaz, aislaron el gen afectado y localizaron la mutación que suele desencadenar la enfermedad. Por aquellas fechas, sólo podían entrever la función normal del gen —es decir, el papel que desempeñaba la proteína producida a partir del ADN sano. Desde entonces, merced a una cascada impresionante de descubrimientos, se ha averiguado que la proteína se comporta a la manera de canal a través del cual el cloruro, uno de los componentes de la sal común, entra y sale de las células. Los bioquímicos conocen ya el mecanismo en cuya virtud la alteración del gen bloquea el transporte de cloruro. Ahora se trabaja en la vinculación del trastorno del movimiento de cloruro con la manifestación paladina de la sintomatología que acompaña a la fibrosis quística. Y según era de esperar, tales avances han aportado nuevas sugerencias sobre la terapia a seguir, algunas de las cuales podrán algún día curar la enfermedad.

Los progresos en el campo de la biología molecular, que han conducido a este momento tan prometedor de la medicina, no se habrían producido sin los esfuerzos pioneros de muchos médicos, cuyas observaciones a la cabecera del paciente enriquecieron el conocimiento de la enfermedad. Durante decenios, la investigación clínica fue muy por delante de la investigación bioquímica en lo que se refiere al esclarecimiento de la naturaleza de la fibrosis.

Entre las contribuciones decisivas hemos de mencionar la de Dorothy H. Andersen, de la Universidad de Columbia. En 1938, tras realizar autopsias de niños de corta edad y de revisar historias clínicas de jóvenes, Andersen presentaba la primera descripción pormenorizada de los síntomas de la fibrosis quística y de las alteraciones de los órganos. Estas alteraciones, cuenta ella, incluían casi siempre la destrucción del páncreas (incluso en niños de muy corta edad) y, a menudo, infección y lesiones de las vías respiratorias. Andersen llamó a esta enfermedad "fibrosis quística del páncreas", en razón de los rasgos microscópicos de las alteraciones que observó en el tejido pancreático.

Hacia finales de los años cuarenta los médicos se percataron de que los conductos y vías de los órganos afectados por la fibrosis quística acostumbraban obstruirse con secreciones muy espesas. En el páncreas, por ejemplo, los conductos que vierten las enzimas digestivas en el intestino están casi siempre taponados, con lo que se altera la capacidad del organismo para digerir alimentos y extraer de ellos los nutrientes.

En el pulmón son los bronquios y bronquiolos los que se obstruyen. En situación de normalidad, estas vías se revisten de una capa de moco que atrapa partículas inhaladas y las lleva hasta la garganta para su expulsión; pero en los pacientes con fibrosis quística, el moco es muy espeso y su eliminación difícil. Basta ese cambio para reducir la luz de las vías respiratorias y dificultar la respiración. Pero hay más: las bacterias atrapadas en el árbol bronquial provocan infecciones que tienden a recidivar y lesionan el tejido pulmonar al atraer células inmunitarias que segregan enzimas y otras sustancias lesivas. Con el transcurso del tiempo, la infección crónica destruye progresivamente las vías bronquiales, lo que añadido a la obstrucción de éstas termina en un fallo respiratorio.

Hacia 1946 el estudio de los pacientes permitía conocer algunos datos relativos a la genética de la fibrosis quística. Después de examinar el cuadro de la herencia familiar de la enfermedad, los expertos dedujeron su carácter recesivo, probablemente debido a la mutación en un solo gen. Si un niño había heredado de ambos progenitores una copia alterada del gen y, por tanto, estaba incapacitado para sintetizar la proteína especifi-

MICHAEL J. WELSH y ALAN E. SMITH han trabajado juntos durante muchos años. Welsh, investigador del Instituto Médico Howard Hughes, enseña fisiología en la Universidad de Iowa. Smith es vicepresidente de investigación de Genzyme Corporation en Framingham, Massachusetts.

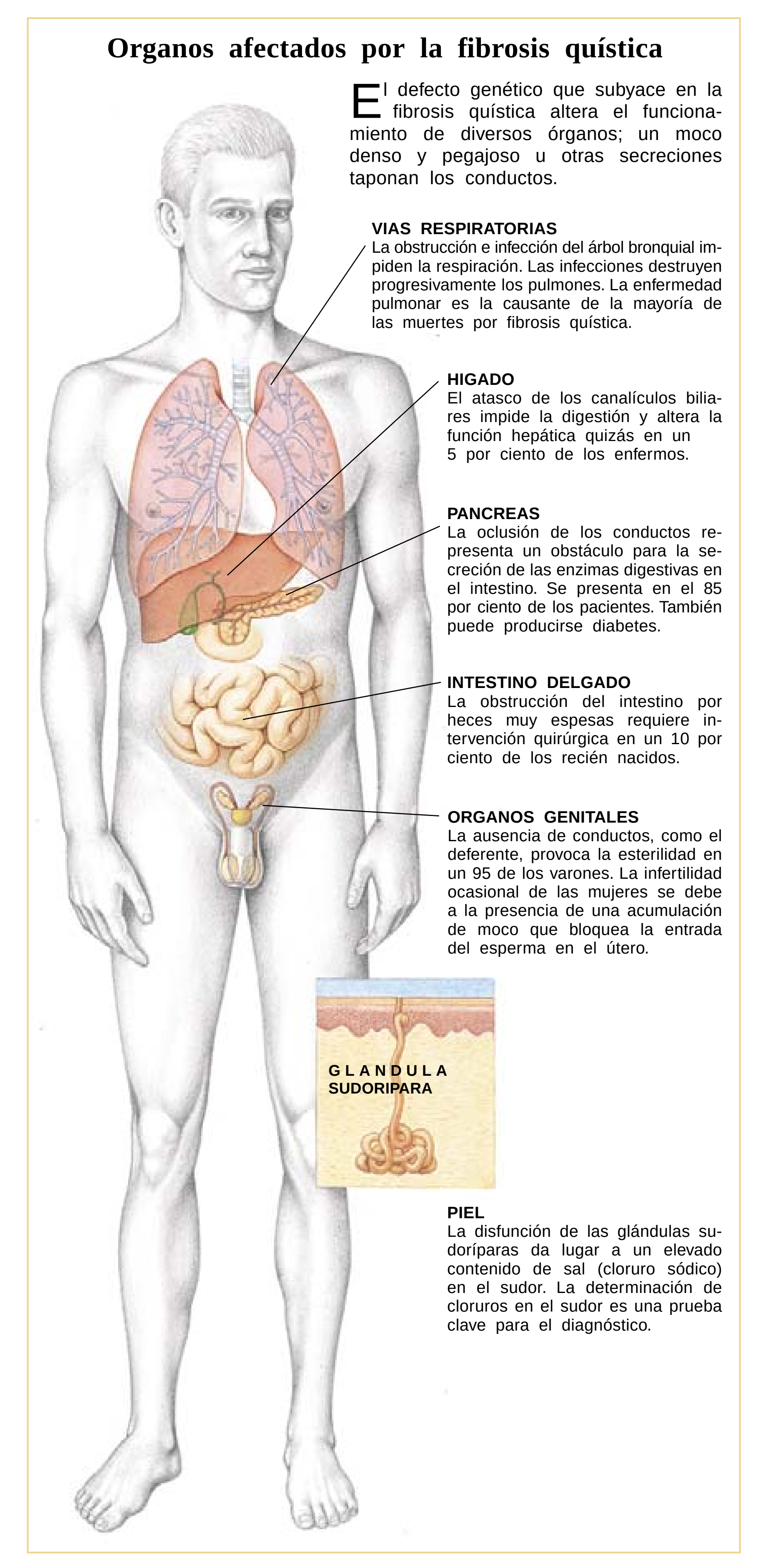


1. LA PERCUSION SUAVE SOBRE EL PECHO ha constituido, durante años, el tratamiento habitual de la fibrosis quística. Con ese golpeteo se busca facilitar la expulsión del moco que ocluye las vías respiratorias en los pulmones. Los investigadores mantienen una viva esperanza de que el conocimiento cada vez más hondo de las bases moleculares de la enfermedad habrá de llevar al diseño de fármacos que eviten el taponamiento de las vías respiratorias. En la fotografía, la madre golpea suavemente el pecho de su hijita. La unidad de color blanco que rodea su antebrazo inyecta en vena antibióticos para combatir la infección pulmonar.

cada por éste, el niño enfermaba; no contraía, sin embargo, la enfermedad cuando había recibido una copia defectuosa y otra normal.

Hoy se sabe que la fibrosis quística es una de las enfermedades de origen genético más frecuentes, que afecta fundamentalmente a personas de raza blanca. Alrededor del 5 por ciento de los individuos de raza blanca de los Estados Unidos son portadores asintomáticos que llevan en sus células una versión mutante del gen. Aproximadamente uno de cada 2500 niños de ascendencia europea es portador de dos copias defectuosas y padece la enfermedad. Por seguir con el ejemplo norteamericano, eso significa que cada año se presentan 1000 casos nuevos y que en la actualidad alrededor de 30.000 padecen la enfermedad.

Unos siete años después de que quedase delineado el cuadro hereditario de la fibrosis quística, la ciudad de Nueva York se cocía literalmente en una ola de calor. A los hospitales acudía un número desproporcionado de niños con fibrosis, que parecían deshidratarse más fácilmente que el resto de la población infantil. El equipo de Paul di Sant'Agnese, de la Universidad de Columbia, observó que esos pequeños perdían una excesiva cantidad de sales a través del sudor. Aunque la razón de la pérdida excesiva de sales no pudo aclararse hasta muchos años después, la observación fue, sin embargo, de un gran



valor clínico. Permitió el desarrollo de una prueba de laboratorio que sigue siendo clave para el diagnóstico de la enfermedad: la determinación de cloruros en el sudor.

Con los años, y gracias a este tipo de trabajos clínicos, se ha llegado a diagnósticos más precisos y precoces, así como a la instauración de mejores tratamientos. Por ejemplo, el fallo pancreático ya no suele amenazar hoy la vida de estos pacientes, al poderse reemplazar las enzimas digestivas ausentes con las oportunas cápsulas ingeridas durante la comida. Controladas en altísima medida las alteraciones digestivas, los problemas pulmonares son los causantes de más del 90 por ciento de la discapacitación y de la muerte de los enfermos con fibrosis quística. Pero las posibilidades de tratamiento de la enfermedad pulmonar se han ampliado también. La terapia actual incluye, por supuesto, las medidas de urgencia en las que se recurre a la percusión del tórax y al drenaje postural. Se tumba al paciente de modo que la cabeza quede inclinada hacia abajo, mientras que otra persona golpea rápida y suavemente sobre el pecho o la espalda —como si sacudiese una botella de salsa de tomate— para liberar las vías respiratorias de las mucosidades que las obstruyen. Los enfermos se benefician, además, de los antibióticos que ayudan a controlar las infecciones repetidas (aunque de ordinario no se consiga eliminarlas). Desde hace unos dos años se dispone de un nuevo tratamiento consistente en la inhalación de un preparado de ADNasa. Con este compuesto se pretende disgregar el moco mediante la digestión de las hebras largas y pegajosas de ADN, que las células que mueren en el proceso liberan.

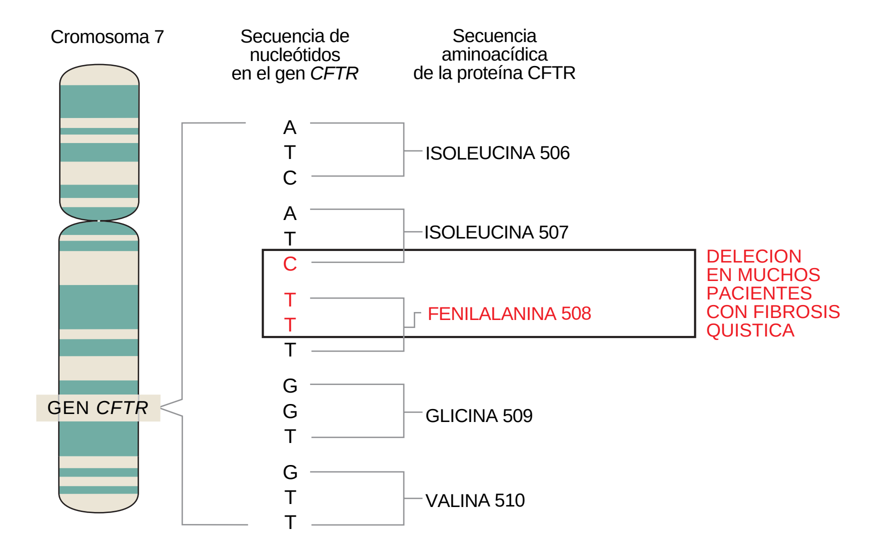
La investigación sobre los mecanismos bioquímicos de la fibrosis quística ha progresado más lentamente que la de los clínicos, aunque el paso se avivó en la primera mitad de los años ochenta. Viose entonces que el funcionamiento del tejido epitelial se resentía en todos los órganos afectados por la fibrosis quística. (El epitelio es una capa de células que forma una barrera entre los distintos compartimientos del organismo; estas capas celulares, que a menudo segregan moco, tapizan el intestino y muchos conductos.) Se abrieron en particular dos líneas de investigación que terminaron por mostrar que los epitelios de estos enfermos eran bastante impermeables

para el cloruro. Es decir, en el tejido epitelial había algún canal transportador de cloruros que no funcionaba correctamente.

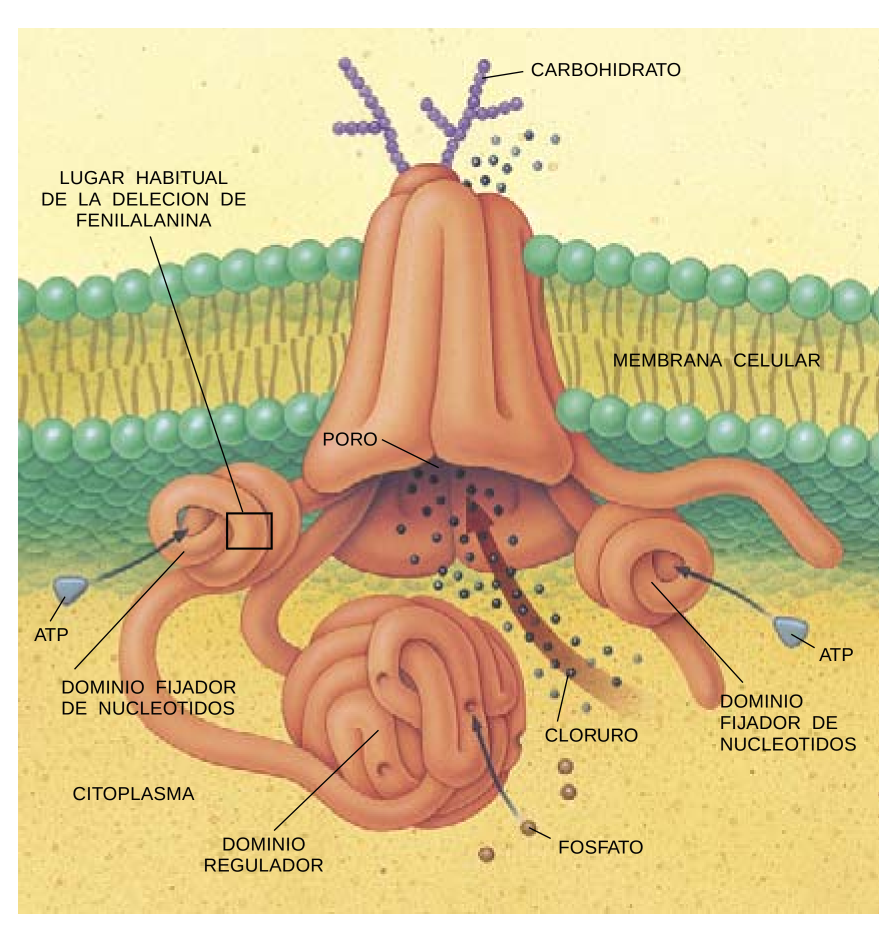
Paul M. Quinton, de la Universidad de California en Riverside, comprobó a lo largo de una serie de trabajos que los epitelios que recubrían los conductos de las glándulas sudoríparas eran incapaces de captar eficientemente el cloruro de la cavidad, o luz, de estas glándulas. Se hallaba así la explicación del carácter hipersalino del sudor de esos pacientes. Producido en la base de las glándulas sudoríparas, el sudor fluye hacia la superficie de la piel a través de un estrecho conducto. En un comienzo, el sudor es una solución rica en iones de sodio y cloruro, los constituyentes de la sal común; mas, a medida que el líquido recorre el conducto glandular, los iones se escapan hacia el interior del epitelio, dejando detrás el agua. Así, el sudor que sale a la superficie de la piel y la enfría es sólo ligeramente salino. En los enfermos con fibrosis quística, por el contrario, la incapacidad del tejido epitelial para absorber el cloruro y la consiguiente alteración de la absorción de sodio de la luz del conducto glandular hacen que el sudor retenga un exceso de cloruro y sea muy salino.

En otra línea de investigación, Michael R. Knowles y Richard C. Boucher, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, centraron su atención en los pulmones. Descubrieron que el flujo de los cloruros del tejido epitelial hacia la luz de las vías respiratorias aparecía amortiguado en tanto que se elevaba la captación de sodio por el epitelio. Se ha corroborado también la aminoración del transporte de cloruros en el epitelio de los conductos pancreáticos de ratón y en el intestino de los pacientes.

Al par que progresaban los estudios sobre el transporte de cloruros, muchos se afanaban en una intensa carrera por descubrir el gen responsable de la fibrosis quística. Estos esfuerzos se vieron recompensados en 1989, cuando un extenso equipo de expertos, dirigidos por Lap-Chee Tsui y John R. Riordan, del Hospital Infantil de Toronto, y por Francis S. Collins, de la Universidad de Michigan, anunciaron el aislamiento del gen. Conscientes de que el producto proteínico del gen influía, directa o indirectamente, sobre el flujo del cloruro impusieron a la proteína una denominación acorde: regulador de la conductancia transmembra-



2. EL GEN DE LA FIBROSIS QUISTICA reside en el cromosoma 7 (*izquierda*). Cifra una proteína, el regulador de la conductancia transmembrana de la fibrosis quística (CFTR). El defecto que más frecuentemente se asocia con la enfermedad es la deleción de tres nucleótidos del gen (*letras rojas en la columna del centro*); esta alteración, conocida como mutación ΔF508, da lugar a la pérdida de un aminoácido —la fenilalanina de la posición 508— en la proteína CFTR (*derecha*). La fenilalanina se pierde porque la maquinaria de la célula que sintetiza las proteínas lee ATT (una manera alternativa de encriptar la isoleucina) en la región del gen correspondiente al aminoácido 507, y a continuación la secuencia GGT para la glicina que acostumbra seguir a la fenilalanina.



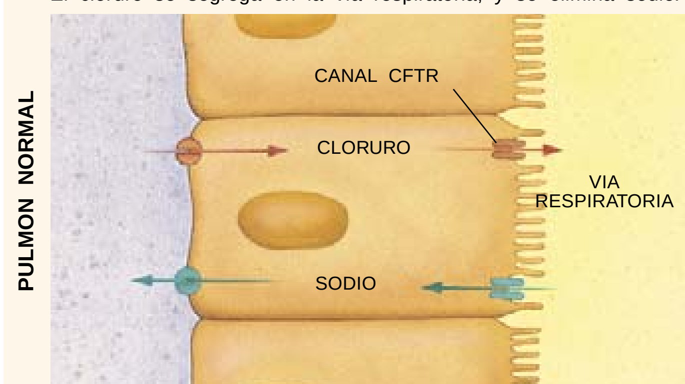
3. LA PROTEINA CFTR INTACTA forma un canal permeable para los cloruros en la membrana externa de muchas células. Aunque se desconoce su estructura precisa, sabemos que el flujo de cloruro que atraviesa el poro está regulado por tres dominios citoplamáticos de la proteína. Sólo se franquea el paso cuando los dos dominios enlazantes de nucleótidos están ocupados por adenosina trifosfato (ATP) y cuando el dominio regulador se fosforila.

CELULAS EPITELIALES

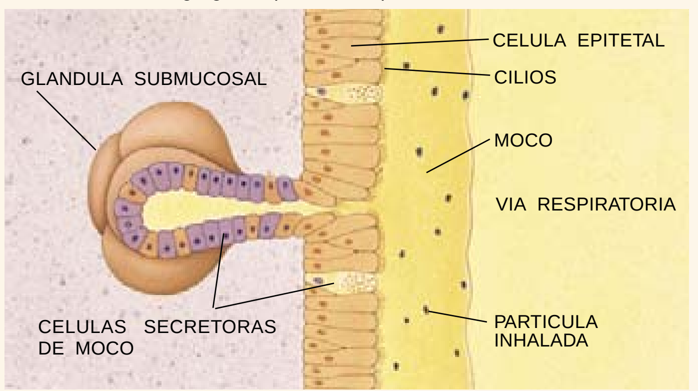
SECCION DEL EPITELIO Y CONDUCTO RESPIRATORIO

PULMON NORMAL

El cloruro se segrega en la vía respiratoria, y se elimina sodio.

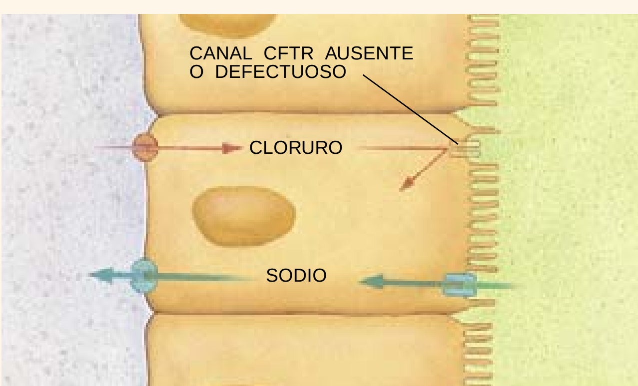


El moco húmedo y fluido atrapa partículas inhaladas; los cilios empujan el moco hacia la garganta para su expulsión.

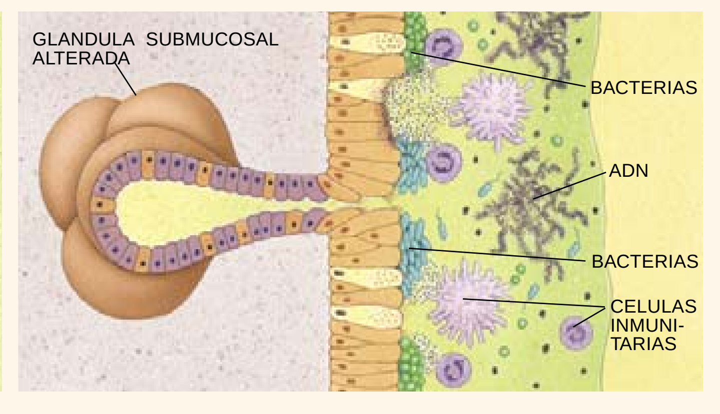


PULMON AFECTADO POR FIBROSIS QUISTICA

Se impide la salida de cloruro fuera de la célula; se potencia la captación de sodio.



El moco se torna espeso y difícil de eliminar. Las bacterias proliferan y atraen a células inmunitarias, que pueden lesionar el tejido sano. El ADN liberado por las bacterias y las células pulmonares incrementan la adhesividad del moco.



4. LA BASE MOLECULAR de la enfermedad pulmonar en los pacientes con fibrosis quística es harto compleja. En los individuos sanos (*hilera superior*), las células epiteliales principales que recubren las vías respiratorias (*panel izquierdo*) presentan al menos dos tipos de canales en la superficie que mira al conducto por donde circula el aire. Uno de ellos —el canal CFTR (*rojo*)— libera cloruro hacia fuera; el otro (*azul*) capta sodio. Esta disposición permite que el moco producido por otras células permanezca húmedo, fluido y fácil de eliminar por las vías respiratorias (*panel central*); por tanto, las vías respiratorias siguen abiertas. En los pacientes con fibrosis quística (*hilera inferior*), la ausencia o el funcionamiento defectuoso del canal CFTR obstaculiza el tránsito de cloruro (*panel izquierdo*) y provoca indirectamente que las células capten

nal de la fibrosis quística (CFTR). Durante la búsqueda del gen, el equipo identificó también una alteración del ADN que parecía dar cuenta de un 70 por ciento de los casos de fibrosis quística. Esta alteración, a la que a menudo se hace referencia como mutación ΔF508, consiste en la deleción de tres nucleótidos (componentes del ADN) del gen; en virtud de dicha pérdida, en la proteína, producto del gen, falta un aminoácido: la fenilalanina de la posición 508.

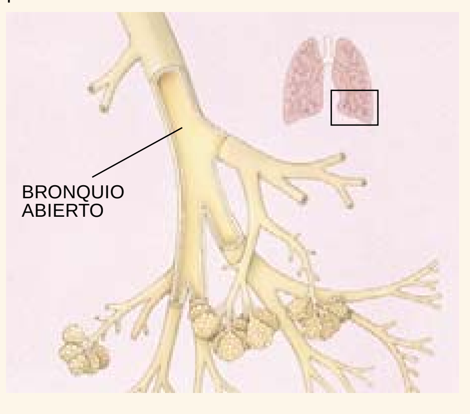
La publicación de los resultados armó un auténtico revuelo en el mundo de la fibrosis quística. Abría un nuevo horizonte y prometía nuevas opciones terapéuticas. Sin embargo, se exigían más datos que confirmaran que se trataba del gen en cuestión. Se obtendría una prueba decisiva si, al insertar una versión correcta en células de un enfermo con fibrosis quística, se restaurase el transporte defectuoso de cloruros. Pero cuantos intentos se empeñaron se vieron frustrados ante las dificultades de construir una versión corregida del gen. Para el verano de 1990, sin embargo, nuestro colaborador Richard J. Gregory, de la compañía Genzyme Corporation, tenía resuelto el problema.

Sin pérdida de tiempo, los autores, con sus colaboradores, insertaron el gen en células epiteliales de afectados. Expusimos luego las células a AMP cíclico, una molécula que estimula el transporte de cloruros en el epitelio de las vías respiratorias, aunque ineficaz cuando se trata del tejido de estos enfermos. Con gran emoción vimos que el AMP cíclico producía la salida de cloruros de las células tratadas; todo hacía pensar que el gen había corregido el defecto de las células que ahora se comportaban con normalidad. Otros investigadores vivieron una excitación similar. Collins y algunos de sus colaboradores habían obtenido resultados parecidos utilizando métodos diferentes con células epiteliales del páncreas.

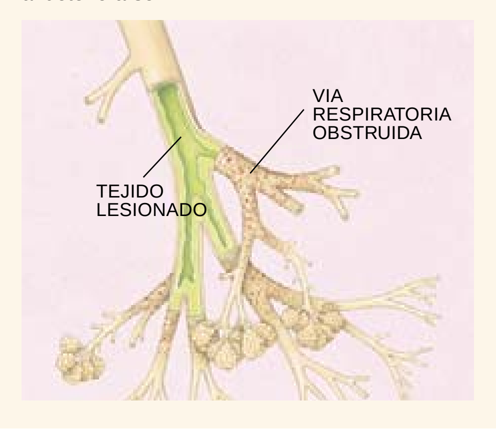
El éxito con células cultivadas sugería que el aporte de genes *CFTR* sanos a los enfermos podría corregir el trastorno bioquímico; una posibilidad realmente estimulante. Pero no se nos escapaban, como después se verá, los muchos obstáculos para conseguir esa meta. Antes debíamos resolver otro problema, el relativo al

BRONQUIOS Y BRONQUIOLOS

Las vías respiratorias, limpias, permiten la respiración.



Las vías respiratorias se obstruyen y comienzan a deteriorarse.



sodio extra (*flecha gruesa de color azul*). El moco se torna entonces más espeso y más resistente a la eliminación (*panel central*), y las bacterias atrapadas en él prosperan. Este conjunto de cambios obstruye las vías respiratorias y causa su destrucción.

modo en que la proteína CFTR influía en el movimiento de cloruros.

La secuencia aminoacídica de la proteína, que se dedujo una vez aislado el gen, ofrecía algunas pistas acerca del funcionamiento normal del polipéptido. Estaba claro que la secuencia presentaba los rasgos característicos de cierta familia de proteínas, las ATPasas de tráfico; se les llama también transportadores ABC porque portan una región enlazante de ATP (*A*TP *b*inding *c*assette). Tal coincidencia implicaba la posibilidad de que la proteína CFTR se asemejara a esta familia en lo que se refiere a su plegamiento y estructura tridimensional.

La familia de ATPasas de tráfico abarca una serie de proteínas que usan las bacterias para bombear nutrientes a través de su membrana celular. Incluye, asimismo, la proteína de resistencia a fármacos que expulsa los agentes quimioterapéuticos de las células cancerosas [véase "Resistencia oncológica a múltiples drogas", por Norbert Kartner y Victor Ling; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1989]. Cuando están plegadas, estas ATPasas presentan cuatro partes estructurales principales, o dominios: dos de ellos atraviesan la membrana (cada uno de los cuales contiene varios segmentos transmembrana) y dos se encuentran en el seno del citoplasma. Las dos últimas unidades, conocidas como dominios enlazantes de nucleótido, captan e hidrolizan ATP (el nucleótido trifosfato de adenosina) para recabar la energía necesaria en el bombeo. Se había predicho que la molécula de CFTR adquiriría la misma forma y, según se verá, que presentaría un componente adicional alojado en el citoplasma.

Apoyados en la función de las ATPasas, algunos propusieron la hipótesis de que la molécula de CFTR era una bomba dependiente de ATP, que transferiría alguna sustancia hacia el interior o el exterior de las células epiteliales; la sustancia transportada induciría entonces el flujo de cloruro a través de la membrana celular por otro canal distinto. Se avanzó este esquema complejo porque ninguno de los canales iónicos conocidos (del tipo de los que se necesitarían para un transporte más directo del cloruro) se asemejaba a la estructura plegada que se había predicho para el CFTR.

De acuerdo con una segunda hipótesis, el propio CFTR se uniría a los canales de cloruro e influiría sobre su actividad. Para una tercera hipótesis, el CFTR podría servir directamente de canal de cloruro aun cuando su estructura no fuera la acostumbrada para cualquiera de los canales iónicos habituales. En esta situación, los dos dominios transmembrana formarían el poro por donde los iones cloruro atravesarían la membrana.

A medida que avanzaban las investigaciones, los datos confirmaban el tercer modelo: el CFTR formaba por sí mismo un canal de cloruros. Vimos que la transferencia de un gen *CFTR* en células impermeables para el cloruro confería la capacidad de mover el ion. Si el gen se modificaba antes, de suerte que afectara partes de la proteína CFTR que se suponía que intervenían en el movimiento de cloruros por el canal, decrecía la

Consejo médico y decisión paterna

Con la identificación de las mutaciones genéticas que originan la fibrosis quística, los padres pueden conocer si son portadores de la enfermedad, es decir, si sus células albergan una copia defectuosa del gen *CFTR*. Los padres pueden averiguar también si el hijo engendrado es portador de dos copias alteradas del gen (uno de cada progenitor).

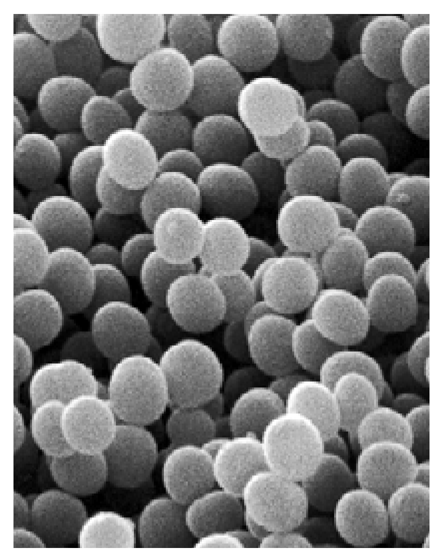
Algunos se turban ante los propios resultados y no aciertan a decidir. Hay en el fondo una limitación por parte de los laboratorios que realizan los análisis genéticos, incapaces de detectar todas las mutaciones en el gen *CFTR*. Quiere ello decir que un resultado negativo no descarta la posibilidad de que alguien sea portador o esté afectado por la fibrosis quística. (Una prueba prenatal favorable, sin embargo, será concluyente, si se demuestra que el feto carece de los mutantes específicos y se descartaría la enfermedad a pesar de los mutantes presentes en los padres.) Más aún, no es posible predecir la gravedad de los síntomas en una persona que herede dos mutantes *CFTR*; aun cuando los genes heredados se asocien con la enfermedad en su forma muy grave o menos grave, tales asociaciones no se cumplen necesariamente en cada individuo.

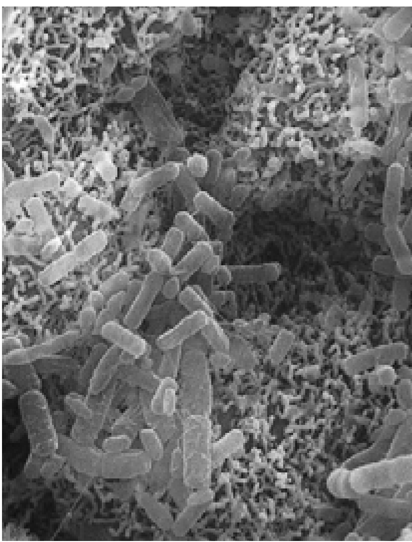
Algunas familias podrían pensar que la investigación progresará con la rapidez suficiente para proteger a los hijos de las alteraciones pulmonares, graves y amenazadoras para la vida, características de la fibrosis quística. Pero las investigaciones médicas no siguen un proceso lineal de avance y tropiezan a menudo con obstáculos. De ahí que, aunque es probable una mayor eficacia terapéutica en el futuro inmediato, nadie puede predecir todavía cuándo podrá tratarse debidamente la fibrosis quística. Los padres han de saber, pues, que reciben a un niño necesitado de cuidados especiales y cuya muerte prematura quizá no pueda evitarse.

Todos estos problemas pueden hacer difícil la toma de decisiones. Pero también es éste un momento de grandes esperanzas en la investigación sobre la fibrosis quística. *—M.J.W. y A.E.S.*

afinidad del canal por estos iones; demostró ese efecto nuestro colaborador Matthew P. Anderson, de la Universidad de Iowa. Cualquier duda quedó despejada cuando el grupo de Riordan insertó proteína CFTR, muy purificada, en membranas celulares artificiales (bicapas lipídicas), que carecían de cualquier otra proteína asimilable a las integrantes de canales. La adición de la proteína purificada permitió el paso de iones a través de la membrana.

En investigaciones ulteriores se desentrañó la función del componente "extra" del CFTR que no se encuentra en las ATPasas de tráfico. Consideradas determinadas secuencias cortas de ese componente, el misterioso segmento habría de ser un dominio regulador —R— cuya actividad citoplasmática estaba controlada por la adición y eliminación de grupos fosfato. Los experimentos, entre otros, de Seng H. Cheng, de Genzyme, y Devra P. Rich, de la Universidad de Iowa, demostraron que, cuando el dominio R carecía de grupos fosfato, los iones cloruro no podían fluir hacia el interior del poro del canal. Pero cuando los cambios químicos en una célula (en particular la elevación de los niveles de AMP cíclico) activaban la fosforilación enzimática del dominio regulador, éstos promovían el tránsito del cloruro a través del poro.





5. ENTRE LAS BACTERIAS que a menudo causan graves infecciones en los pulmones de los pacientes con fibrosis quística se encuentran *Staphylococcus aureus* (*arriba*) y *Pseudomonas aeruginosa* (*abajo*). Una vez que las infecciones logran asentarse, casi invariablemente recidivan.

Pese a la simplificación que ello entraña, resulta útil imaginar que, cuando el dominio regulador no está fosforilado, funciona como una compuerta que bloquea la apertura citoplasmática del poro de la membrana. La adición de los fosfatos desplaza el dominio (se abre la compuerta) y franquea el paso de los iones cloruro al interior del poro. Otros análisis han demostrado que los dominios fijadores de nucleótidos afectan también a la actividad del canal. Para que los iones atraviesen el poro, dichos dominios deben enlazarse en el ATP, con la consiguiente hidrólisis de éste.

Sabemos que la proteína CFTR forma un canal de cloruro; conocemos las líneas generales del mecanismo de operación de la molécula. Se plantea entonces una cuestión cuya respuesta, de momento, ignoramos: ¿qué relación existe entre la mutación del gen *CFTR* y la pérdida del transporte de cloruros? Se ha estudiado con cierto detalle el efecto de la mutación más común en la molécula de ADN: la deleción que lleva a la pérdida de la fenilalanina de la posición 508.

La deleción aludida genera un defecto en el tráfico intracelular. Muchas proteínas, entre ellas la molécula normal de CFTR, se procesan una vez sintetizadas. Adquieren algunos grupos glucídicos en el retículo endoplasmático; después, adquieren nuevas moléculas de azúcar en el aparato de Golgi, antes de emigrar a la membrana celular. La proteína mutante, por el contrario, no abandona el retículo endoplasmático; su migración se detiene por la presumible razón de que el sistema de control de calidad en dicho compartimiento celular percibe el plegamiento inadecuado de la proteína. En efecto, las proteínas reputadas defectuosas se marcan para su degradación antes de permitir su ulterior procesado.

Aunque la mutación de la fenilalanina 508 es la más frecuente, se han encontrado centenares de otras mutaciones en pacientes de fibrosis quística. Lo mismo que sucede con la mutación 508, muchos de estos cambios bloquean el camino de la proteína hacia la membrana celular. Algunas mutaciones impiden la síntesis de proteína, y otras que permiten su fabricación e inserción en la membrana celular se oponen a que la molécula de CFTR opere de forma debida. En este último caso, las mutaciones podrían suspender el movimiento de iones por haberse alterado la función de un dominio fijador de un nucleótido o por algún defecto en el tapizamiento del poro transportador de iones.

En general, las personas cuyas células poseen dos copias del gen con la mutación de la fenilalanina 508 tienden a padecer la enfermedad en su forma grave, por la probable razón de que la proteína consigue sólo en escasa proporción, o no lo logra en absoluto, salir del retículo endoplasmático. En los pacientes cuyos genes permiten al menos que algunas de las moléculas de CFTR alcancen la membrana celular para transportar cloruros en cierto grado, esta actividad residual puede atenuar algunos de los síntomas más graves. Pero no siempre ocurre así, por lo que no podemos predecir qué acontecerá en cada caso individual. En efecto, dos pacientes con idénticas mutaciones en ambas copias de su gen *CFTR* pueden diferir notablemente en el grado de alteración de sus órganos. Tal divergencia obedece a la presumible intervención, en el curso de la enfermedad, de otros factores genéticos y ambientales cuya naturaleza desconocemos.

Deja un regusto amargo saber que el conocimiento creciente de los defectos genéticos sigue sin explicar por qué la alteración del transporte de cloruro en el epitelio pulmonar afecta al transporte de sodio y por qué estos cambios conducen a la acumulación de moco en el árbol bronquial. Se ha descubierto, además, que las glándulas submucosales —productoras de moco y situadas bajo la superficie del epitelio— producen una gran cantidad de proteína CFTR. ¿Qué papel desempeñan tales glándulas en la enfermedad? Algo que desconcierta aún más en las vías respiratorias de los pacientes con fibrosis quística es la mayor predisposición a sufrir infecciones por ciertas bacterias. Así, menudean las infecciones de *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*. Se trata de una línea de

Estrategias para el tratamiento de las alteraciones pulmonares

El tratamiento de la enfermedad pulmonar característica de la fibrosis quística puede abordarse desde muchos frentes. Las estrategias potenciales van desde la corrección del defecto genético en la raíz de los problemas pulmonares hasta la sustitución del pulmón afectado por otro sano.

TRASTORNOS	ENFOQUE	ESTADO ACTUAL
Mutación en el gen *CFTR*	Insertar un gen normal mediante terapia génica; suministrar una proteína CFTR normal a las células	La terapia génica está en fase de pruebas clínicas preliminares; los métodos para introducir directamente la proteína son ineficaces
Desplazamiento defectuoso de la proteína CFTR hasta la membrana externa	Administración de fármacos capaces de escoltar la proteína hasta la membrana de las células epiteliales	No se ha identificado ninguno capaz de realizar la función de escolta
Movimiento defectuoso de los iones cloruro a través de los canales de CFTR en la membrana celular	Administración de fármacos que eleven la actividad de otras clases de canales de cloruros en las células epiteliales	Este tipo de fármacos se halla en fase de ensayo clínico
Oclusión de las vías respiratorias con moco viscoso	Percusión de pecho y espalda para facilitar la eliminación de las secreciones, administración de ADNasa y otros fármacos para licuar las secreciones	La percusión del tórax es el tratamiento habitual; se emplea ya ADNasa y se están ensayando fármacos similares en animales
Infecciones recidivantes que dañan los pulmones	Administración de antibióticos para destruir las bacterias o la de anticuerpos (moléculas especiales del sistema inmunitario) contra microorganismos	Se hace amplio uso de los antibióticos; los anticuerpos están en fase de prueba en animales
Alteraciones de los tejidos por la respuesta inmunitaria contra las bacterias	Administración de fármacos que reduzcan los efectos nocivos de la respuesta inmunitaria	Se utilizan fármacos antiinflamatorios esteroideos; agentes antiinflamatorios (principalmente ibuprofen) están en fase de prueba
Destrucción del pulmón	Trasplante de un pulmón sano	El trasplante se convierte a veces en una opción

investigación en la que apenas se ha empezado a trabajar.

¿Cumple la proteína CFTR otras funciones, además de las relacionadas con el canal de cloruro? Se habla de la posibilidad de que el *CFTR* regule canales de cloruro distintos. Se supone también que podría alterar indirectamente la composición de la mezcla de azúcares en la superficie epitelial, para primar la colonización por determinadas bacterias.

Pese a las cuestiones pendientes, del conocimiento adquirido desde 1989 han nacido varios planteamientos para abordar la fibrosis quística. En primer lugar, compensar la pérdida de los canales de cloruro de CFTR intensificando la actividad de otra clase diferente de canales de cloruros. A este respecto, se sabe que existen canales controlados por iones de calcio en la cara de la superficie de las células epiteliales que da a la luz glandular. Aunque estas moléculas no contrarrestan de suyo la pérdida del canal de CFTR, quizá pudiera aumentarse artificialmente su conductancia para los cloruros. Es una posibilidad que está sometida a prueba en los pacientes.

Tal vez algún día logremos introducir la proteína CFTR purificada en las células que la demandan; los trabajos realizados con cultivos celulares han demostrado que las moléculas de la proteína pueden corregir el flujo de cloruros en las células portadoras de una mutación en el gen *CFTR*.

Cabría también, en teoría, administrar fármacos capaces de escoltar las moléculas mutantes de CFTR desde el retículo endoplasmático hasta la membrana celular, pasando por el aparato de Golgi. Merece la pena prestar atención a esta idea. En efectos, las proteínas CFTR resultantes de la mutación ΔF508 que se atascan en el retículo endoplasmático suelen funcionar bastante bien cuando se insertan experimentalmente en la membrana externa de las células. Lamentablemente no hay todavía fármacos capaces de corregir anormalidades del tráfico intracelular. Un enfoque diferente, aún por investigar, sería el uso de fármacos que redoblaran la actividad de algunos de los canales de CFTR mutantes que hubieran conseguido abrirse paso hasta la membrana celular.

Con todo, la opción que despierta el máximo interés es la de la terapia génica, que insertara una copia del gen *CFTR* en las células que lo necesitaran. El ADN insertado en las células diana debería dirigir la síntesis de la proteína CFTR normal y corregir el trastorno bioquímico primario que subyace bajo la fibrosis quística. La importancia de este planteamiento estriba en que, yendo las cosas bien, la introducción del gen debería restituir todas las funciones de la proteína CFTR, incluidas las todavía ignoradas.

El método mejor estudiado de terapia génica es el que se basa en la capacidad que exhiben los virus para penetrar en las células, llevando consigo su ADN. Con otros investigadores que consideran posibles vectores en el transporte de genes, los autores se han fijado en los adenovirus, porque tales microorganismos infectan las vías respiratorias del hombre produciendo una enfermedad relativamente inocua: el resfriado común. Podemos modificar los adenovirus de dos formas. En primer lugar, se eliminan genes víricos para evitar que el virus se reproduzca en la células y cause la sintomatología; en segundo lugar, el ADN escindido se reemplaza con el gen *CFTR*. Nuestro grupo, así

como los de Ronald G. Crystal, del Instituto Nacional de Enfermedades del Corazón, del Pulmón y de la Sangre, y James M. Wilson, de la Universidad de Michigan, han demostrado que tales vectores pueden acarrear el gen *CFTR* hasta células epiteliales en cultivo y células de las vías respiratorias de animales. Y, lo que es aún más importante, las células usan el ADN para sintetizar moléculas de CFTR que funcionan como canales de cloruro normales.

Basándose en estos experimentos, varios grupos están empeñados en administrar el gen *CFTR* a pacientes mediante vectores de adenovirus genéticamente modificados. El objetivo de estos experimentos pioneros es, sobre todo, el de valorar su inocuidad. Otros, y también los autores, han estudiado ya la capacidad de los adenovirus portadores de gen *CFTR* para corregir el transporte de cloruros en el epitelio nasal de los fibrosos. Hemos escogido el epitelio nasal por su semejanza con el del árbol bronquial y por su mayor accesibilidad.

Nuestra primera prueba ha sido muy estimulante. Por razones experimentales, comenzamos por aplicar directamente el virus modificado a zonas del epitelio nasal. El tratamiento corrigió parcialmente el transporte de cloruro durante algún tiempo. Otro estudio parecido que vino después tuvo menos éxito, y un tercero llevado a cabo por un grupo diferente no demostró ningún aumento del flujo de cloruros. Estos hallazgos indican que los vectores adenovíricos necesitan un mayor perfeccionamiento antes de que puedan utilizarse como vehículo de genes en terapias específicas.

Aun cuando se descubriera el método ideal de inserción de genes a través de virus, habría que hacer frente a otro problema. La mayoría de las células del tejido epitelial se reemplazan cada pocos meses. Por tanto, la terapia génica tendría que administrarse varias veces al cabo del año —al menos hasta que se consiga que otras células, más escasas y de vida más prolongada, recibieran de manera permanente un gen *CFTR* normal. Aparte de los inconvenientes y de los gastos, la necesidad de tratamientos múltiples constituye una fuente de preocupación, porque la gente responde a los adenovirus con una respuesta inmunitaria que acaba eliminando los microorganismos y evitando la infección repetida. Para que la terapia génica triunfara, habrían de encontrar maneras de "ocultar" los adenovirus a la vigilancia del sistema inmunitario o crear otros vectores que no desencadenaran ninguna respuesta inmunitaria.

Una opción alternativa al empleo de los virus sería la de recubrir el gen terapéutico con moléculas lipídicas no reconocibles por el sistema inmunitario, pero que, no obstante, permitiese al ADN penetrar en las células. El trabajo reciente llevado a cabo por el equipo de Eric Alton, del Real Hospital Brompton de Londres, en los propios afectados abona la viabilidad de este enfoque para restaurar la permeabilidad del epitelio de las vías respiratorias para el cloruro, aunque este grupo, como el nuestro, ha limitado su estudio al tejido nasal. Sin olvidar que debe multiplicarse la eficacia de la administración de genes mediante sistemas no víricos.

Es mucho lo que los científicos tienen todavía que averiguar antes de comprender por qué la pérdida de la proteína CFTR conlleva las manifestaciones de la fibrosis quística. Habrá que vencer, además, numerosos retos técnicos antes de que cualquier terapia compense esa pérdida. Pero se progresa en muchos frentes, y así resulta fácil mostrarse optimista ante los trabajos en marcha, con la confianza de que los próximos años habrán de ver nuevas y mejores terapias para esta enfermedad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CYSTIC FIBROSIS: MOLECULAR BIOLOGY AND THERAPEUTIC IMPLICATIONS. Francis S. Collins en *Science*, vol. 256, págs. 774-779; 8 de mayo de 1992.

CYSTIC FIBROSIS TRANSMEMBRANE CONDUCTANCE REGULATOR; A CHLORIDE CHANNEL WITH NOVEL REGULATION. M. J. Welsh, M. P. Anderson, D. P. Rich, H. A. Berger, G. M. Denning, L. S. Ostedgaard, D. N. Sheppard, S. H. Cheng, R. J. Gregory y A. E. Smith en *Neuron*, volumen 8, n.º 5, págs. 821-829; mayo de 1992.

THE CYSTIC FIBROSIS TRANSMEMBRANE CONDUCTANCE REGULATOR. J. R. Riordan en *Annual Review of Physiology*, vol. 55, págs. 609-630; 1993.

MOLECULAR MECHANISMS OF CFTR CHLORIDE CHANNEL DYSFUNCTION IN CYSTIC FIBROSIS. M. J. Welshy A. E. Smith en *Cell*, vol. 73, n.º 7, págs. 1251-1254; 2 de julio de 1993.

CYSTIC FIBROSIS. M. J. Welsh, L. C. Tsui, T. F. Boat y L. Beaudet en *Metabolic and Molecular Basis of Inherited Disease*. Dirigido por C. R. Scriver, A. L. Beaudet, W. S. Sly y D. Valle. McGraw-Hill, 1994.

La Torre inclinada de Pisa

La famosa torre ha estado inclinándose desde el siglo XII. Ahora los ingenieros usan la técnica del siglo XX con la esperanza de salvar esa añeja maravilla del arte

Paolo Heiniger



La torre inclinada nunca estuvo derecha. Poco después de que los trabajos comenzaran en 1173, los cimientos se desnivelaron, y la torre empezó a inclinarse hacia el norte. Cuando se reanudó la construcción, después de un parón de cerca de cien años, el edificio cedió de nuevo, de tal manera que, hacia 1272, se estaba ladeando visiblemente hacia el sur. Hoy, la parte más alta del campanil está descentrada en 5,227 metros, inclinándose en dirección sur.

A lo largo de la historia del monumento, los arquitectos y los ingenieros han intentado detener la inclinación, pero, desde que comenzaron en 1911 los controles sistemáticos, la desviación de la coronación de la torre se ha incrementado en un ritmo persistente de unos 1,2 milímetros por año. Los temores acerca de la seguridad de la obra de arte se agudizaron cuando otro campanil construido de forma similar, el de la catedral de Pavía, se desplomó en 1989. Poco después, la torre de Pisa fue cerrada a los visitantes.

En 1990 una comisión especial, compuesta por expertos italianos y de otros países en los campos de ingeniería de estructuras, geotecnia, historia del arte y restauración de monumentos, fue reunida por el gobierno italiano para determinar nuevas vías que salvaran la torre. El grupo, del que formo parte, denominado Consorzio Progetto Torre di Pisa, ha supervisado varios proyectos que han estabilizado la estructura y frenado la velocidad de su inclinación.

Los esfuerzos iniciales se centraron en el exterior de la torre, pero en los próximos meses se intentarán otras técnicas más radicales para detener la inclinación del campanil. Estos métodos se aplicarán directamente al suelo, modificando el asentamiento del monumento. Se realizan ya ensayos bajo tierra a gran escala en la Piazza dei Miracoli, donde se asienta la torre, aunque todos los trabajos se hacen en zonas alejadas del mismo monumento. Se pretende así evitar que una alteración del suelo adyacente a la torre dañe el edificio.

El propósito final no es enderezar el campanil. La estructura cedió en diferentes direcciones durante las primeras etapas de su construcción; por eso, quedó encorvada como un plátano y nunca llegará a enderazarse del todo. Sí se espera disminuir su desviación en la coronación en unos 10 o 20 centímetros. Con suerte, se dejará el monumento estable durante el próximo siglo, cuando una nueva generación de científicos acometan el viejo problema, de 800 años de persistencia, de la torre inclinada de Pisa.

LA PIAZZA DEI MIRACOLI en Pisa debe su fama a su torre inclinada, que se construyó como campanil de la catedral inmediata. En este grabado de 1829, la cúspide del monumento se encuentra desviada unos cinco metros del centro.

La cimentación

Los estratos de arcilla y de tierra bajo la torre se han compactado desigualmente, provocando la inclinación del monumento. Los primeros siete metros bajo la estructura están formados por una mezcla de lodo, arcilla y tierra arenosa. Por debajo, y hasta unos 20 metros de profundidad, hay una capa de arcilla Pancone, que se caracteriza por su color gris azulado. La franja arenosa que separa estos dos estratos superiores es horizontal, excepto debajo de la torre, donde forma una depresión en artesa. Más abajo, alternan los estratos de arcilla y arena hasta una profundidad aproximada de 70 metros. La superficie completa de la Piazza se hunde gradualmente; parece, sin embargo, que en algunos lugares desciende más deprisa que en otros.

BARRO, ARCILLA Y SUELO ARENOSO

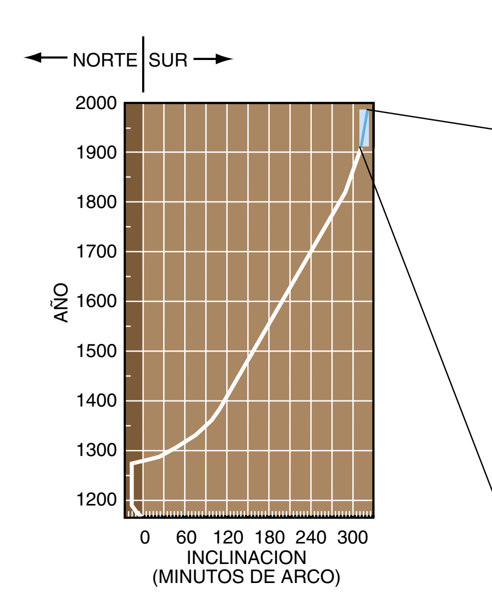
ARCILLA PANCONE

ARCILLA

ARENA

ARCILLA

ARENA SEDIMENTADA

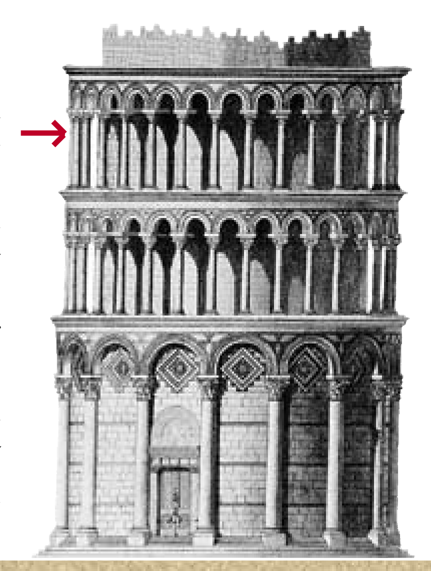


Ocho siglos de inclinación

Aunque en un comienzo la torre cedió hacia el norte, en la mayor parte de su historia el edificio se ha inclinado hacia el sur. El ritmo de la inclinación se agudizó durante la primera parte del siglo XIV. Entre 1911, cuando se iniciaron controles cuidadosos, y 1990, la parte más alta de la torre se dobló a un ritmo de 1,2 milímetros por año. En 1993 empezaron a notarse los recientes esfuerzos para frenar la velocidad de inclinación.

Primera etapa: 1173-1178.

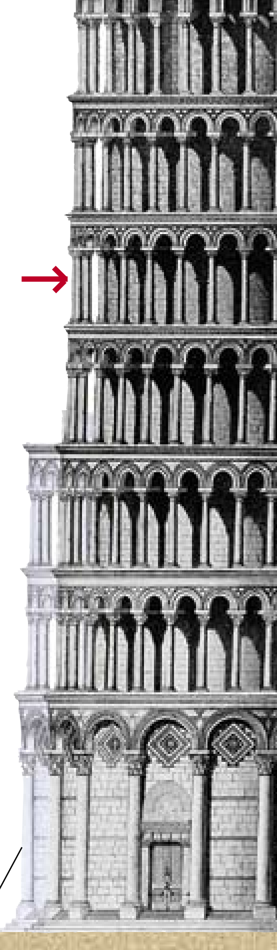
El campanil de Pisa se inclinó gradualmente durante su construcción. Se desarrolló ésta en tres etapas que cubrieron cerca de 200 años. La primera piedra se colocó en 1173 y, durante la etapa inicial de trabajo, el monumento se inclinó ligeramente hacia el norte. Inclinación que se aprecia en el mismo diseño de la torre: para mantener el nivel de los primeros pisos, los operarios hicieron las columnas y los arcos del tercer piso algo más altos en el lado norte que en el lado sur. Los disturbios políticos ocurridos en la ciudad obligaron a parar la construcción en 1178, en medio de los trabajos del cuarto nivel de la torre.



INCLINACION DE LA TORRE EN 1178

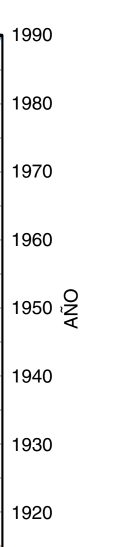
Segunda etapa: 1272-1278

Los trabajos se reanudaron casi cien años después, en 1272. Por entonces la torre se había inclinado hacia el sur, dirección en la que está cediendo todavía en la actualidad. Una vez más, los arquitectos intentaron corregir la inclinación, ahora ajustando la altura del quinto piso, levantando el costado sur algo más alto que el lado norte. En 1278, terminados ya siete pisos, los trabajos de la torre cesaron de nuevo a causa de la inestabilidad política. Hacia 1292 la inclinación del campanil resultó tal, que se pidió a un grupo de maestros albañiles que investigasen el problema; fue ésa la primera de un sinnúmero de comisiones que se habrían de constituir para remediar la inclinación a lo largo de los últimos 700 años.



INCLINACION EN 1178

INCLINACION EN 12



Sellado de la base de la torre

Pero los distintos esfuerzos por salvar la torre han tenido efectos inesperados. Por ejemplo, en 1935, algunos pensaron que el exceso de agua del subsuelo debilitaba la cimentación. Y así se aprestaron a sellar la base de la torre para impedir que el agua se filtrase desde abajo. El plan comprendía taladrar repetidamente en la cimentación a un cierto ángulo, y después rellenar los agujeros con una lechada de cemento. El efecto puede verse en el gráfico de la izquierda: en 1935 el ritmo de la inclinación subió más de seis veces respecto al del año anterior.

ORIFICIOS RELLENOS CON LECHADA DE CEMENTO

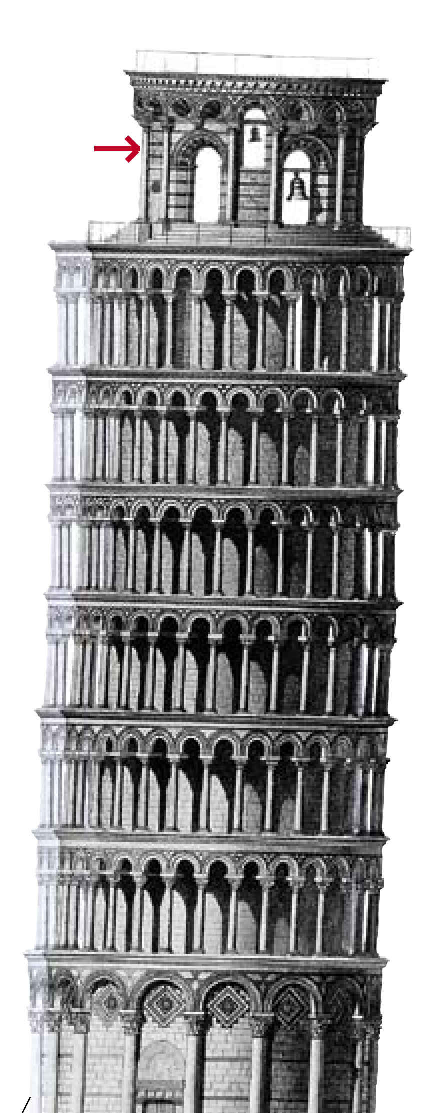
Tercera etapa: 1360-1370

El remate del octavo piso, donde se alojan las campanas, se realizó entre 1360 y 1370. De nuevo los arquitectos intentaron corregir el declive hacia el sur, esta vez inclinando las paredes del último piso hacia el norte. Las distintas correcciones de los arquitectos medievales pueden verse mejor en una sección transversal de la torre (*mostrada en el extremo derecho*). Estos esfuerzos, combinados con el ritmo lento de la construcción (que dio tiempo a la cimentación del edificio para comprimirse y, consecuentemente, para compensar el declive), evitaron el derrumbamiento de la torre.

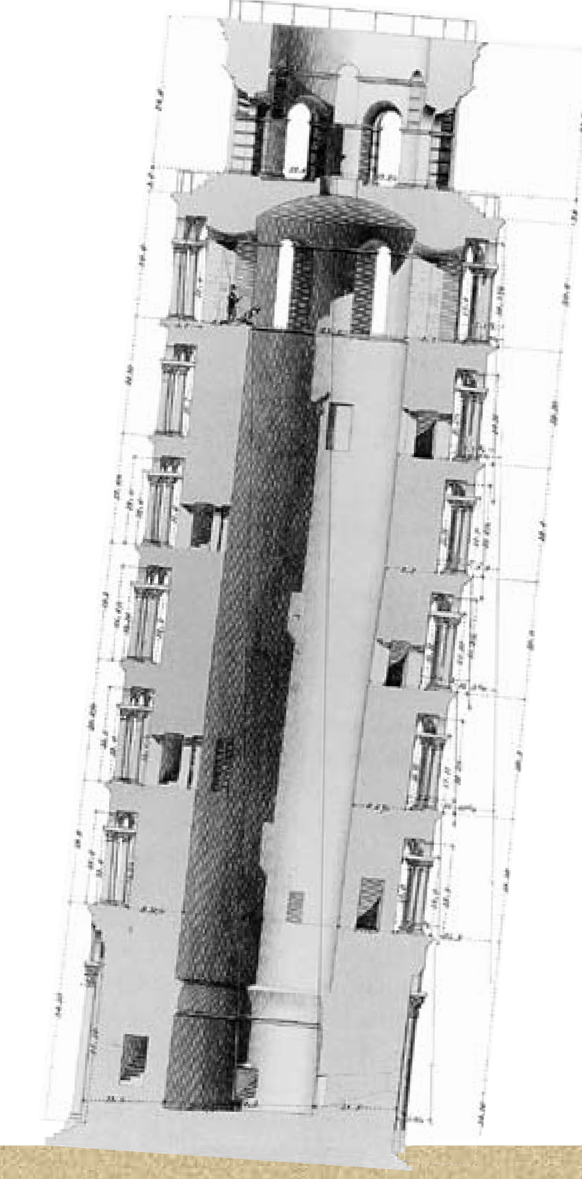


78

INCLINACION EN 1278



INCLINACION EN 1370



ACTUAL INCLINACION DE LA TORRE



Esfuerzos modernos para enderezar la torre

La actual comisión internacional encargada de salvar la torre ha considerado diferentes técnicas para estabilizar el monumento. Así, el grado de inclinación induce una enorme tensión en la pared sur, que podría provocar el desplome del edificio. En 1992, los operarios arriostraron el nivel del primer piso del edificio con bandas de acero, para prevenir la fractura de la sillería en esa zona.

Una vez implantada esta medida de seguridad, el autor de este artículo y sus colaboradores están investigando cómo detener el movimiento de la torre. Se han acumulado más de 750 toneladas de lingotes de plomo en la parte norte de un anillo de hormigón que rodea la base del campanil pisano. Este peso detuvo la tendencia de la torre a inclinarse y desplazó la coronación del edificio hacia el norte unos 2,5 centímetros en un período de nueve meses, de junio de 1993 a febrero de 1994.

BANDAS DE ACERO

LINGOTES DE PLOMO

MECANISMO DE PERFORACION PARA EXTRAER LA TIERRA (PROPUESTA)

ANILLO DE HORMIGON (EN CONSTRUCCION)

ELECTRODOS PARA EXTRAER POR ELECTRO-OSMOSIS EL AGUA DE LA ARCILLA (PROPUESTA)

SERIES DE CABLE PARA ANCLAR EL ANILLO DE HORMIGON A UNA CAPA PROFUNDA DE ARENA (PROPUESTA)

En junio de 1995 los ingenieros empezaron a instalar otro anillo de hormigón alrededor del monumento. Después anclarán el anillo en una capa de arena a 50 metros de profundidad bajo el lado norte, por medio de cables de acero tendidos desde la vertiente septentrional. El segundo anillo, que reemplazará a los pesos de plomo, ejercerá un esfuerzo estabilizador aún mayor. Esperamos que con esta solución la torre se enderece otros 2,5 centímetros en su coronación.

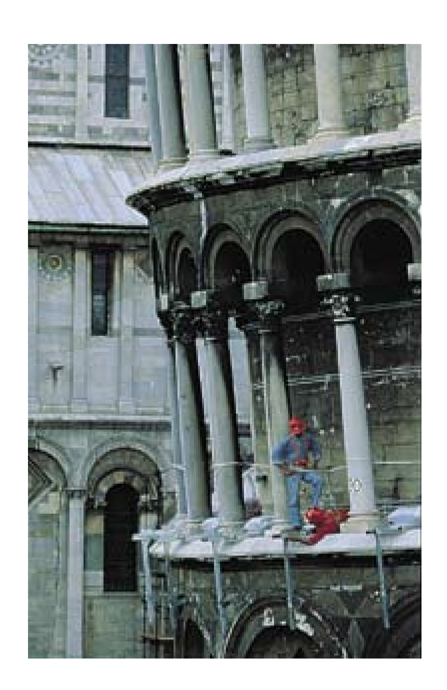
Medidas técnicas más radicales, que están estudiándose, permitirían alterar las características del subsuelo. El equipo técnico considera la posibilidad de utilizar electroósmosis para consolidar los estratos de arcilla situados entre 10 y 20 metros de profundidad. Grandes electrodos, hechos con tubos de acero insertados en el terreno, generarán un campo eléctrico en la arcilla. Este campo atraerá el agua hacia los electrodos, permitiendo extraer una pequeña cantidad de agua del barro subyacente bajo la zona norte de la cimentación. En consecuencia, los estratos de arcilla se comprimirán, lo que posibilitará que la pared norte baje lentamente y se sitúe casi al mismo nivel que el lado sur. O bien, de seguirse métodos de drenaje, podrían extraerse pequeños volúmenes de tierra del subsuelo de la cara norte, reduciendo el espesor de las capas y posibilitando que la torre se asiente sobre una superficie más horizontal.



Se han depositado más de 750 toneladas de plomo en el lado norte de la base de la torre. El peso ha rebajado la cimentación en ese costado y, por consiguiente, ha enderezado la torre en un par de centímetros.

La torre aloja ahora en su interior un equipo de control que detecta los desplazamientos de la inclinación, por minúsculos que sean. En septiembre de 1995, por ejemplo, se comprobó que, en el intervalo de dos días, la coronación de la torre se había doblado hacia el sur 0,24 milímetros.





Bandas de acero abrazan al segundo piso, que está en peligro de derrumbarse a causa de la presión ejercida en esta parte del monumento. Debido a la inclinación de la torre, gran parte de su peso de 14.700 toneladas reposa sobre el costado sur.



PAOLO HEINIGER es director de obra del Consorcio Proyecto Torre de Pisa y ha coordinado los trabajos del monumento durante los tres últimos años. Obtuvo su título de ingeniería en la Universidad Técnica de Milán y ha trabajado en Italia, en el Extremo Oriente, en el Reino Unido y en los países escandinavos, en diversos proyectos relacionados con la ingeniería de la cimentación.

Nota del editor: Los grabados de este artículo están tomados del libro *Architecture of the Middle Ages in Italy: Illustrated by Wiews, Plans, Elevations, Sections, and Details of the Cathedral, Baptistery, Leaning Tower or Campanil, and Campo santo at Pisa: From Drawings and Measurements Taken in the Year 1817*, por Edward Cresy y George L. Taylor, publicado en Londres en 1829.

Philip Yam

MARTIN GARDNER: *Tahúr de la matemática*

El dependiente de la librería Barnes and Noble, en el centro de Manhattan, no me sirve de gran ayuda. Tras un relativo éxito en el rastreo por los estantes, espero que el ordenador pueda decirme cuáles de las 50 obras —más o menos— que ha escrito Martin Gardner están disponibles en el abultado catálogo de la librería. La mayoría de sus escritos se ocupan de recreaciones matemáticas. Pero también ha firmado libros de literatura, filosofía y ficción. Busco, en concreto, *The Whys of a Philosophical Scrivener*, compilación de ensayos donde Gardner va destilando su visión de la vida. El dependiente me sugiere que busque en la sección de religión, bajo el epígrafe "Fricción (*sic*) cristiana".

Cuando le relato la anécdota, Gardner frunce el ceño, rompiendo el gesto amable de su cara. También él está sorprendido, pero por una razón diferente. El libro nada tiene que ver con eso, insiste Gardner. Se toma a pecho definirse a sí mismo como un filósofo teísta, en la tradición, asegura, de Platón y Kant, entre otros.

En nuestra conversación hablamos mucho de teología y filosofía, algo que no esperaba del hombre que durante 25 años escribió la sección "Juegos matemáticos" de *Scientific American* y que, durante el proceso, influyó en incontables personas. "Me parece que toda mi generación de matemáticos creció leyendo a Martin Gardner", comenta Rudy Rucker, de la Universidad estatal de San José. No es infrecuente encontrarse con gente que se suscribía buscando sólo las adivinanzas matemáticas, una proeza que no pasó inadvertida a los responsables de la revista cuando Gardner solicitó su retiro en 1981. "He aquí la carta que siempre he temido recibir de Martin Gardner", decía la nota que le pasó el entonces director Dennis Flanagan al editor Gerard Piel. "Tenía muchos libros por escribir", comenta Gardner justificando su decisión. "Simplemente me faltaba tiempo para escribir la sección. La eché de menos, pues conocí a muchos matemáticos famosos gracias a ella."

En su sala de estar de Hendersonville (Carolina del Norte) evoca algunos de estos notables. Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, enfrascado ahora en la relación entre consciencia y cerebro, se hizo famoso cuando Gardner reseñó que el británico había encontrado una forma de embaldosar un plano sin que se repitiera el mismo patrón. John H. Conway, de la Universidad de Princeton, vio cómo el juego de la vida, un programa de ordenador que constituye una metáfora de la evolución, saltaba a la fama tras aparecer en la sección. Lo más sorprendente para mí, sin embargo, es la mención del artista holandés M. C. Escher, a cuyo trabajo dio publicidad en 1961. Me señala un grabado original de Escher entre los estantes de topes metálicos antiguos para puertas que colecciona su mujer. Si hubiera sabido que Escher se iba a hacer famoso, dice Gardner, habría comprado más. "Es una de las pocas pinturas en color", recalca. "Se basa en el modelo de Poincaré del plano hiperbólico."

Gardner, que cuenta ya con 81 años, se encuentra más a gusto hablando de otros que de sí mismo. Quizás en parte porque él no tiene estudios formales de matemáticas. Hablando de su juventud, musita algo de religión y filosofía. "Cuando crecí en Tulsa, se la llamaba la capital del mundo del petróleo", dice. "Ahora es conocida porque es la ciudad de Oral Roberts. Tan bajo ha caído." Recuerda a su padre, experto en prospecciones petrolíferas, como un hombre tolerante que se las arregló para convivir con la devoción metodista de su madre y el temprano fanatismo del joven Gardner. Influenciado por un maestro de la escuela dominical, adventista del séptimo día, Gardner creía que la segunda venida estaba cerca y que el 666 era el número del Papa. "Crecí en la convicción de que la Biblia era una revelación dictada letra a letra por Dios. Me duró hasta la mitad de mis años en la Universidad de Chicago".

La vida universitaria, empero, erosionó lentamente sus excesos fundamentalistas. "Ciertos autores han ejercido sobre mí una gran influencia", dice mientras pasa recuento: Platón, Kant, G. K. Chesterton, William James, Charles S. Peirce, Miguel de Unamuno, Rudolf Carnap y H. G. Wells. De cada uno ha destilado un poco de sabiduría. "De Chesterton obtuve el sentido de misterio que envuelve al universo, de por qué existen las cosas", expone. "De Wells me quedé con su interés y respeto por la ciencia." Y prosigue: "No creo que Dios interrumpa las leyes naturales o haga trampas con el universo." De James derivó su noción de que la creencia en Dios es cuestión de fe.

Meditar sobre la existencia y el sentido de las cosas no le solucionarían el pan de cada día. "Si uno es un filósofo profesional, no hay otra manera de ganarse el sustento que enseñando. No tiene ninguna utilidad en otro sitio", asevera. Se puso a escribir, y llegó a redactor adjunto de temas de petróleo en el *Tulsa Tribune*, volviendo luego a Chicago para hacerse cargo de un puesto en la oficina de prensa de la universidad. En 1941 se enroló por cuatro años a bordo de un destructor de escolta (el nombre le venía al pelo: *U.S.S. Pope*). Tras la segunda guerra mundial, Gardner regresó a Chicago, vendiendo relatos cortos al *Esquire* y apuntándose a más cursos de filosofía.

La vida del columnista independiente es azarosa. Gardner recaló en Nueva York a principios de los años cincuenta, con un contrato estable de la revista infantil *Humpty Dumpty's Magazine*; allí escribía reportajes y diseñaba tareas extraescolares. "Yo hacía todos los recortables", dice con abierta sonrisa. Pero fue su permanente interés por la magia, que constituye todavía su principal diversión, lo que le llevó a los juegos matemáticos. Todos los sábados un grupo de conspiradores se reunía en un restaurante de Manhattan. "Habría unos 50 magos, aproximadamente, haciendo trucos." Uno de ellos le intrigó con un hexaflexágono, una tira de papel, doblada en forma hexagonal, que se da la vuelta al apretar desde dos lados. Fascinado, Gardner se fue a Princeton, donde unos estudiantes de doctorado lo habían inventado. (El mago también tuvo una intervención

notable en otro gran paso de la vida de Gardner: le presentó a la que sería su mujer, Charlotte.)

Había vendido un artículo sobre máquinas lógicas a *Scientific American* unos años antes (que, curiosamente, incluía un recortable de cartulina), y se llegó a la revista con un artículo sobre flexágonos. "Gerard Piel me llamó y me dijo: ¿Hay más material como éste para abrir una sección fija? Le dije que pensaba que sí, y me propuso que la empezara", recuerda Gardner. Fue como tirarse de la moto, que diría una zagalón hoy. Gardner no tenía entonces ni un manual de matemáticas. "Recorrí la ciudad de punta cabo y compré cuantos libros hallé sobre recreaciones matemáticas."

Empezó su nueva etapa en el número de enero de 1957; la rúbrica "Mathematical Games" ("Juegos matemáticos") la escogió la revista. "Es una coincidencia que fueran mis iniciales", observa. "Siempre he sentido interés particular en las matemáticas, pese a carecer de una formación académica en ese campo. Me convertí en una especie de matemático autodidacta. Si se echa un vistazo a esas columnas en orden cronológico, se puede ver que empezaron a un nivel mucho más elemental que las últimas."

En aquella época, en muy pocas publicaciones aparecían recreaciones matemáticas. "Muchos matemáticos creativos estaban haciendo descubrimientos, pero las revistas especializadas consideraban trivial en exceso los resultados para admitirlos en sus páginas. Así que tuve el placer de recoger todo ese material." Quizá más importante para el éxito de la sección fuera su carácter francotirador. "Sus referencias eran maravillosamente multiculturales y amplias", asegura Rucker. "Hablaba de literatura experimental, de artilugios, de filósofos... relacionando las matemáticas con las cosas más excitantes del entorno." Consiguió también formar una red de asociados que le proporcionaban ideas. "Martin lo hacía muy bien cuando se trataba de citar a los autores", reconoce Ronald L. Graham, de los Laboratorios AT&T Bell. "Eso era un incentivo para que la gente trabajara en los problemas."

Tras su mirada ingenua se esconde un talante bondadoso y juguetón. Para celebrar los Inocentes no se le ocurrió otra cosa que publicar que la teoría de la relatividad de Einstein había resultado ser falsa y que Leonardo da Vinci había inventado el inodoro. A sugerencia de un amigo, criticó



Martin Gardner, entre su colección de objetos matemáticos y mágicos

duramente su propio libro *Whys* en un artículo escrito bajo el pseudónimo de George Groth. "He oído que hubo gente que leyó la crítica y no compró el libro basados en mi recomendación", asegura.

Aunque su casa parece un dechado de orden y formalidad, por todas partes sobresale su natural bromista. Abundan las ilusiones ópticas, entre ellas una máscara del revés que parece holográfica y que extrañamente sigue los movimientos del que la mira. Me enseña varios trucos de magia con tiras de goma, y en cierto momento revuelve en un armario para sacar un brazo falso amputado, chorreante de sangre, a través del cual mueve sus propios dedos. Nada más cabal que esa sensación de hallarse en el País de las Maravillas: Gardner es un experto acabado en Lewis Carroll. En su libro más vendido, *The Annotated Alice*, saca a la luz mensajes criptográficos de Carroll, jugadas de ajedrez y caricaturas de gente a la que conoció.

Tras casi 40 años de divulgar las matemáticas, Gardner dice que la mayor transformación en ese campo ha sido la irrupción del ordenador. "Ha cambiado el carácter de toda la matemática, especialmente de la matemática combinatoria, donde los problemas son imposibles de resolver a mano. Un buen ejemplo es el problema del mapa de cuatro colores, que hubo de resolverlo un ordenador." El teorema asegura que al menos son necesarias cuatro tonalidades para pintar todos los mapas planos de manera que no haya dos regiones adyacentes que presenten el mismo color. La teoría del caos, los fractales y la descomposición en factores primos son algunos otros ejemplos.

La jubilación no ha dejado a Gardner en el dique seco. Escribe para el *Skeptical Inquirer*, aunque está pensando en abordar temas que no sean simplemente farsas, como la teoría de los sueños de Freud y las falsas memorias evocadas por los terapeutas. Y es tiempo de juegos. Durante mi visita, llamó un editor para comunicarle el interés de su empresa en publicar sus manuscritos sobre las adivinanzas matemáticas de Lewis Carroll. Gardner describe un problema reciente que recibió desde Japón: se trataba de una hormiga que recorría un cubo extendido. Un matemático telefonea para preguntarle si ha oído algo de un nuevo resultado sobre los mosaicos de Penrose. Y todas las tardes, a las cuatro y media en punto, él y Charlotte investigan la dinámica de fluidos en un cóctel de vodka. Para Gardner, el juego es la vida.

Ciencia y sociedad

Oncología

Intervención de la telomerasa

La telomerasa es una enzima, la ADN polimerasa encargada de la replicación de los extremos de los cromosomas, o telómeros (del griego, *telos*, extremo, y *meros*, parte). Ya en los años cincuenta, Barbara McClintock vislumbró la importancia de estas estructuras terminales. McClintock observó que la pérdida de telómeros producía inestabilidad cromosómica que, con el tiempo, conducía a la muerte celular. Desde entonces se han aislado y secuenciado los telómeros de numerosos organismos.

Los telómeros son estructuras que se distinguen por su carácter conservador a lo largo de la evolución. Consisten en repeticiones en tándem de una secuencia rica en guaninas; el número de repeticiones, variable, depende de la especie y de la edad de los individuos. Los telómeros de todos los mamíferos están formados por repeticiones de la secuencia TTAGGG. En los seres humanos, el número de repeticiones varía desde unas 15 kilobases en los recién nacidos a unas 5 kilobases en ancianos. (Una kilobase es una secuencia de 1000 bases de ADN.)

James Watson, codescubridor de la estructura del ADN junto con Francis Crick, propuso que, dado que todas las ADN polimerasas conocidas requerían un ADN o un ARN cebador a partir del cual pudiera elongarse la cadena nucleotídica, la replicación de los extremos de los cromosomas lineales era incompleta, salvo que existiera algún mecanismo especial para evitar la pérdida de material genético de los extremos durante las sucesivas divisiones celulares.

Molécula de telomerasa de Tetrahymena *en proceso de elongación del extremo 3´ de un telómero. La ilustración representa las dos subunidades proteicas y una molécula de ARN, donde la secuencia utilizada de molde está en negrita. Se indican los distintos pasos en el proceso de síntesis de nuevas secuencias teloméricas*

Sin embargo, en 1985 Elizabeth Blackburn y Carol Greider, que estudiaban el ciliado *Tetrahymena*, descubrieron una actividad ADN polimerasa que era capaz de sintetizar *de novo* secuencias teloméricas sin necesitar un molde externo. A esta enzima de función transferasa se le denominó telomerasa, abreviación de *Telomere Terminal Transferase*. Más tarde se logró clonar y caracterizar la telomerasa de *Tetrahymena*. Sabemos, así, que se trata de una molécula de ARN y de dos polipéptidos, de 85 y 90 kilodaltons.

En *Tetrahymena* y en otros organismos donde se ha clonado el componente ARN, se ha visto que contiene una secuencia complementaria al telómero. Esta secuencia la utiliza la enzima como molde para la síntesis de secuencias teloméricas. Por tanto, las telomerasas son un tipo especial de ADN polimerasas dependientes de ARN, o transcriptasas inversas; en ellas la molécula ARN molde constituye parte integrante de la estructura de la enzima.

El tamaño de las moléculas de ARN varía en las distintas especies. Oscilan entre unos pocos cientos de pares de bases en los ciliados y más de 1 kilobase en levaduras. Pese a la disparidad en tamaños y secuencias de estos componentes ribonucleicos de las telomerasas, cabe presumir que todos compartan una misma estructura secundaria.

Desde el descubrimiento de la actividad telomerasa en los ciliados, han fracasado cuantos intentos se han realizado por encontrar una actividad telomerasa en células normales humanas. Con todo, se ha detectado actividad telomerasa en las células de la línea germinal y en tejidos embrionarios. Ese descubrimiento ha llevado a proponer que la telomerasa se hallaría activa en la línea germinal y durante los primeros estadios del desarrollo embrionario, cuando las células acometen un frenético proceso de división, mientras que se hallaría inactiva en los tejidos adultos.

El hecho de que la telomerasa falte en la mayoría de los tejidos adultos da a entender que la longitud de los telómeros de las células somáticas disminuye con la edad: la

ausencia de una actividad telomerasa impediría compensar la pérdida de telómeros durante las sucesivas divisiones celulares, acortamiento de los telómeros que, además, podría ser un mecanismo de senescencia celular.

Los ensayos realizados con cultivos de células humanas o con tejidos donados por individuos de distintas edades han demostrado que la longitud de los telómeros disminuye con el número de divisiones celulares. Dicho de otro modo, la capacidad replicativa de una célula o tipo celular depende de la longitud de sus telómeros. A diferencia de los eucariotas unicelulares, que pueden dividirse infinitas veces y que tienen actividad telomerasa, las células somáticas de organismos pluricelulares son mortales; el progresivo acortamiento y pérdida de los telómeros desencadena la inestabilidad cromosómica y muerte celular.

Sin embargo, se ha encontrado actividad telomerasa en células humanas que son inmortales, tales como las células HeLa. El estudio de la actividad telomerasa adquirió una relevancia especial con el descubrimiento, en 1994, por Jerry Shay y Cal Harley, de que la telomerasa se muestra activa en más del 80 % de distintos tipos de tumores humanos y ausente en tejidos circundantes. Se acepta ahora que la activación de la telomerasa en células de tejidos adultos es una alteración oncogénica que confiere inmortalidad a las células tumorales. En otras palabras, la telomerasa sería un mecanismo de la célula para evitar la senescencia celular y adquirir un fenotipo inmortal.

No conocemos los mecanismos moleculares que regulan la actividad telomerasa durante el desarrollo normal de un individuo o durante la formación de tumores. Pero hay pruebas de que la activación de la telomerasa constituye un evento tardío en la formación de tumores. En este sentido, sólo se ha detectado actividad telomerasa en los estadios más avanzados de los tumores, pero no en tumores benignos o en diversos estadios preneoplásicos. La telomerasa se perfila, pues, como un candidato ideal para ser una diana específica de terapia contra el cáncer. Los inhibidores de la telomerasa presumiblemente afectarían la capacidad replicativa de las células del tumor, pero no la de la gran mayoría de los tejidos humanos.

Antes de comprometerse al desarrollo de drogas que inhiban específicamente la telomerasa es necesario demostrar que la actividad de esta enzima resulta necesaria para la progresión y mantenimiento de tumores. El desarrollo de modelos transgénicos en los que se haya eliminado un gen esencial para la actividad telomerasa (por ejemplo el gen del componente ribonucleico) será el siguiente paso para determinar la importancia de la enzima tanto en el desarrollo embrionario normal de un organismo como en la formación de tumores malignos y metástasis.

María A. Blasco
Laboratorio de Cold Spring Harbor, Nueva York

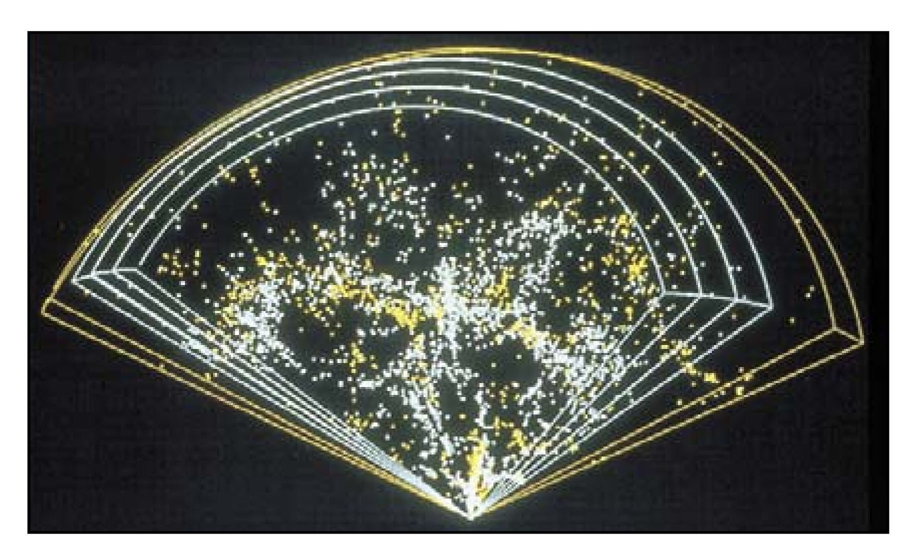
Cosmografía

Macroestructura y multiescalas

La Vía Láctea es una galaxia de tipo espiral que contiene más de cien mil millones de estrellas. Forma parte del Grupo Local, integrado por una treintena de galaxias, entre las que se cuenta también la de Andrómeda, a 2,2 millones de años luz de la Tierra. El Grupo Local ocupa el volumen de un cubo de 3 millones de años luz de lado. Más del 70 % de las galaxias se encuentran en grupos como ése o en cúmulos todavía más ricos y densos; por ejemplo, el cúmulo de Virgo, que dista 60 millones de años luz de la Tierra. La región central del cúmulo de Virgo alberga más de 1000 galaxias en un volumen que sólo cuadruplica el del Grupo Local.

La distribución de galaxias en el espacio es casi la única información que disponemos sobre la cosmografía a gran escala. A lo largo de los últimos diez años, se han elaborado mapas tridimensionales de distribución de galaxias que nos permiten tener una visión más completa de la macroestructura cósmica. Para calcular la distancia a la que se encuentra una galaxia, medimos el desplazamiento hacia el rojo de la radiación que emite. Interpretándolo como efecto Doppler podemos estimar a qué velocidad se está alejando. La ley de Hubble nos dice que dicha velocidad aumenta con la distancia a la que se halla la galaxia en cuestión.

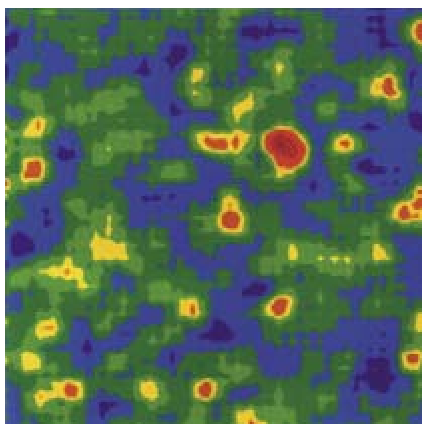
Conocidas la distancia y la dirección en el cielo podemos construir una imagen tridimensional. En esta cartografía cósmica observamos que las galaxias se disponen en filamentos y estructuras más o menos aplanadas, que dejan a su vez grandes zonas vacías sin la presencia aparente de materia luminosa. Una imagen familiar que ilustra esta distribución es lo que se conoce como “universo de burbujas”, en el que los gran-



1. Imagen del universo en 4 “rebanadas”, perteneciente al catálogo del Centro de Astrofísica de Harvard. Cada uno de los 3962 puntos representados corresponde a una galaxia de la que se conoce su posición en el espacio tridimensional. La Tierra se sitúa en el vértice de la figura, encontrándose el límite exterior a 650 millones de años luz de distancia. La Gran Muralla cruza la imagen de izquierda a derecha a 400 millones de años luz de la Tierra. La presencia de filamentos y vacíos queda patente. (Imagen cedida por M. J. Geller, J. P. Huchra y E. E. Falco, del Observatorio Smithsoniano de Astrofísica.)

des vacíos serían como las pompas de jabón que se forman en la espuma. En esta imagen, las galaxias se distribuyen en la superficie de las burbujas; forman estructuras planas, así la Gran Muralla, o filamentosas, como la cadena de Perseus-Pisces. Las zonas más densas del tejido cósmico serían los cúmulos ricos en galaxias.

La distribución de galaxias a escalas inferiores a los 40 millones de años luz no es homogénea, sino que presenta una fuerte tendencia al agrupamiento. Para medir estadísticamente el agrupamiento podemos utilizar una magnitud escalar que nos indica cuántas galaxias esperamos encontrar en promedio dentro de una esfera de radio r centrada en una galaxia elegida al azar. Si las galaxias se distribuyesen aleatoriamente en el espacio, esta cantidad sería proporcional al volumen de la esfera, es decir, variaría con la escala r como una constante por r^3. Si el comportamiento es el de una ley de potencias, r^D, pero con un exponente $D < 3$, la distribución posee estructura fractal, en la que el exponente D es la dimensión fractal, o más correctamente la dimensión de correlación. Se sabe que, para escalas inferiores a 40 millones de años luz, la distribución de galaxias desarrolla una estructura fractal con $D \cong 1{,}3$.



2. Distribución de densidad de una simulación cosmológica en un cubo de 1400 millones de años luz de lado. La imagen se obtiene proyectando sobre un plano la simulación tridimensional. El rojo corresponde a los picos de mayor densidad y el azul a las regiones menos densas, siguiendo la secuencia del arco iris. Diferentes estructuras dominan a escalas distintas, lo que pone de manifiesto la estructura multifractal subyacente. (Reproducido con permiso de *Science*, número 269, página 1245. Copyright 1995. American Association for the Advancement of Science.)

La imagen del universo va de ese modo cambiando de acuerdo con las escalas de observación, desde estructuras próximas que no presentan homogeneidad hasta escalas donde podemos considerar que la materia muestra una distribución uniforme. Para interpretar esa transición hemos desarrollado un modelo, en colaboración con S. Paredes, S. Borgani y P. Coles.

El modelo se funda en el análisis de la distribución de galaxias y cúmulos galácticos en escalas que van desde 40 hasta algo más de 200 millones de años luz. A estas escalas no hay homogeneidad en el universo. Para entenderlo, piénsese que el diámetro de los grandes vacíos que se han observado en la distribución de galaxias alcanza en algunos casos los 200 millones de años luz. Pero también se ha detectado que la tendencia al agrupamiento no es tan fuerte como la manifestada para escalas inferiores a los 40 millones de años luz. El valor obtenido de la dimensión D a escalas superiores es de $D \cong 2{,}5$ para las galaxias de los catálogos en el espectro óptico de radiación. Sin llegar todavía al valor $D = 3$, que sería el correspondiente a la homogeneidad, se acerca al doble del valor que obteníamos para escalas inferiores a los 40 millones de años luz. El valor de la dimensión de correlación para el catálogo de galaxias obtenido por el satélite *IRAS* que observa en el infrarrojo es $D \cong 2{,}8$. Esto nos indica que las galaxias del *IRAS* presentan un agrupamiento inferior al de las galaxias observadas en el óptico, con lo que se confirma algo que ya sabíamos: las galaxias del *IRAS*, que son sobre todo espirales, se encuentran, en general, en entornos menos densos que las observadas en el óptico, entre las que hay una buena proporción de galaxias elípticas. Estas últimas prefieren habitar en el interior de los cúmulos ricos.

Hemos estudiado la distribución de los cúmulos galácticos basándonos en catálogos realizados a partir de placas fotográficas y a partir de las fuentes de rayos X detectadas por el satélite *ROSAT*. Y hemos comprobado que, para escalas entre 40 y 220 millones de años luz, los cúmulos presentan un valor de $D \cong 2{,}1$. De lo que se infiere un grado de agrupamiento mayor que el de las galaxias.

La propiedades de multiescala nos proporcionan un marco interpretativo para entender simultáneamente la distribución de galaxias de diferentes tipos y de cúmulos galácticos con diferente riqueza. La dimensión D será menor para los objetos más densos. Hemos comprobado que las propiedades de multiescala se verifican en modelos cosmológicos que simulan la distribución de los cúmulos de galaxias. La dinámica de estas simulaciones está dominada por la presencia de materia oscura.

En un futuro próximo dispondremos de un catálogo tridimensional de más de un millón de galaxias. Se obtendrá con el empleo de técnicas observacionales que permiten medir simultáneamente los desplazamientos hacia el rojo de muchas galaxias, gracias a complejos sistemas de fibras ópticas. El catálogo, al que se le ha impuesto el nombre de *SLOAN*, representará un salto cualitativo en el conocimiento de la macroestructua cósmica, y será entonces cuando debamos contrastar nuestros modelos teóricos con unas observaciones que prometen ser extraordinariamente reveladoras.

VICENT J. MARTÍNEZ
Depto. de Astronomía y Astrofísica
Universidad de Valencia

Mecanismos de secreción

En las terminaciones nerviosas

Las terminaciones nerviosas adrenérgicas almacenan y secretan adrenalina o noradrenalina como neurotransmisor. Durante los últimos años nuestro equipo de la Universidad de Alicante ha centrado sus esfuerzos en el estudio de sus mecanismos de secreción. Para ello hemos empleado técnicas electrofisiológicas y bioquímicas.

Resulta muy difícil abordar el estudio electrofisiológico directo de estas estructuras. Son muy pequeñas, de un diámetro aproximado de 1 micrometro, y se hallan embebidas en el órgano efector, es decir, en el órgano que inerven y sobre el que, cuando se estimula el nervio, producen un determinado efecto.

Para resolver esa aporía, decidimos investigar y recurrir a modelos alternativos, como la célula cromafín y el nervio hipogástrico ligado de gato. Las células cromafines, que se encuentran localizadas en la zona central de las cápsulas suprarrenales, contienen adrenalina y noradrenalina, al igual que las terminaciones nerviosas adrenérgicas ya mencionadas, pero

no inervan ningún órgano, sino que secretan estas sustancias a la sangre. Por esa razón, este modelo carece de órgano efector.

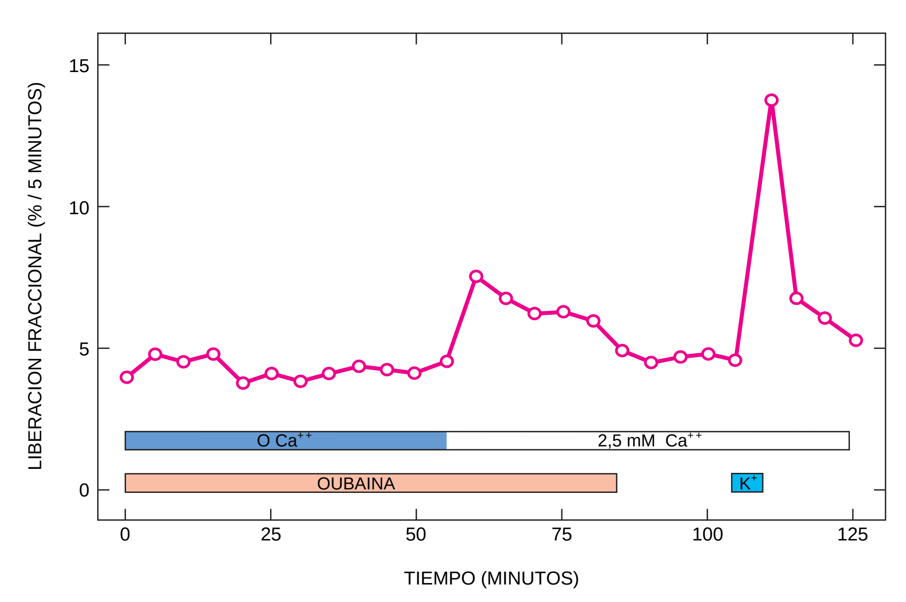
El nervio hipogástrico ligado de gato es un tronco nervioso adrenérgico en el que, mediante una ligadura, se ha interrumpido el proceso de transporte de distintas moléculas (receptores, canales iónicos, calmodulina, etcétera) desde el lugar donde se sintetizan (el cuerpo neuronal) hasta la terminación nerviosa. Dicho proceso se realiza a lo largo del axón, por lo que se denomina transporte axoplásmico.

Este último modelo comparte muchas de las propiedades de las terminaciones nerviosas adrenérgicas, como son su capacidad de secretar catecolaminas ante el mismo tipo de estímulos, presencia de colinoceptores, canales iónicos de sodio y calcio dependientes de voltaje y un sistema de captación de noradrenalina, sensible a cocaína, e imipramina.

Para validar este nuevo modelo de preparación, exploramos la presencia y funcionalidad, en el nervio hipogástrico ligado, de dos sistemas. El primero lo constituía la enzima sodio-potasio-ATPasa, que se encuentra en la membrana celular y cuya función estriba en transportar iones sodio desde el interior al exterior de la célula e introducir simultánemente iones potasio. De esta manera, dicha enzima consigue mantener los gradientes de concentración fisiológicos de Na^+ y de K^+ dentro y fuera de la célula, a costa de consumir energía en forma de adenosín trifosfato (ATP).

El segundo sistema lo formaba el intercambiador de iones sodio y calcio. Ambos sistemas están presentes en las terminaciones nerviosas adrenérgicas. La estrategia empleada en este estudio consistió en medir la secreción de noradrenalina en el nervio hipogástrico de gato ligado, provocada por el tratamiento con ouabaína.

La ouabaína es un fármaco que produce un bloqueo de la función de la enzima Na^+, K^+–ATPasa. Este bloqueo impide que la enzima cumpla su misión transportadora de iones sodio del interior al exterior celular, acumulándose Na^+ en el interior. El aumento de la concentración de Na^+ intracelular obtenido es proporcional a la concentración de Na^+ extracelular presente; ello provoca que el intercambiador Na^+/Ca^{2+}, que introduce Na^+ a favor de gradiente de concentración y a la vez extrae Ca^{2+}, comience a funcionar en modo reverso: saque fuera Na^+ e introduzca Ca^{2+}, proceso que desencadena la secreción de catecolaminas.



Curso temporal de la secreción de noradrenalina inducida por ouabaína en un nervio hipogástrico ligado 48 horas. Los nervios se incubaron con ouabaína en un medio carente de iones calcio, si bien persistía, durante 60 minutos, una concentración fisiológica de sodio. La reintroducción de Ca^{2+} en el medio de incubación provocó una notable liberación de noradrenalina, que cabe atribuir al aumento de la concentración de Ca^{2+} libre intracelular; el incremento del calcio obedece a la activación del sistema de intercambio, a través de la membrana, entre los iones sodio y calcio

Inicialmente, se identificaron los lugares de fijación de ouabaína en membranas de nervio hipogástrico. Se encontró un único lugar de fijación, de alta afinidad, tanto en las membranas del nervio ligado como en las del no ligado. En los nervios ligados, el número de lugares de fijación aumentó con el tiempo transcurrido desde la ligadura, alcanzando el máximo a las 48 horas, lo que sugiere un proceso de transporte axoplásmico.

Según dijimos, la unión de la ouabaína a estos lugares de fijación bloquea la función de la Na^+, K^+–ATPasa e induce la liberación de noradrenalina, que es también dependiente de la concentración de calcio presente en el medio extracelular. La dosis de ouabaína capaz de producir el 50 por ciento de la liberación máxima posible se denomina dosis efectiva 50 (DE50) de aproximadamente 50 micromoles. La máxima cantidad de noradrenalina liberada constituye, aproximadamente, el 9 % del contenido total de noradrenalina de las células.

Según es de esperar, si la liberación de noradrenalina, provocada por la presencia de ouabaína, se debiera al aumento de Ca^{2+} intracelular subsecuente a la activación en modo reverso del intercambiador Na^+/Ca^{2+}, el efecto de ouabaína dependería de la presencia de Na^+ en el medio de incubación, ya que modificaría la fuerza iónica del gradiente de sodio. Esto se demostró cuando, al repetir el estudio en presencia de concentraciones crecientes de Na^+ extracelular, se observó un incremento de la secreción de catecolaminas inducida por el tratamiento con ouabaína. Dicho incremento fue proporcional a la concentración de ion sodio. Tomados en conjunto, estos datos sugieren la presencia y funcionalidad del sistema de intercambio Na^+/Ca^{2+} en la membrana axoplásmica del nervio hipogástrico de gato ligado.

La similitud entre la secreción de noradrenalina inducida por ouabaína en este sistema y la que tiene lugar en otros sistemas adrenérgicos apoya la idea de que el nervio hipogástrico ligado está equipado con un sistema de intercambio Na^+/Ca^{2+} que es funcionalmente activo y que contribuye al mantenimiento de los niveles de Ca^{2+} libre intracelular. Estos datos, que se suman a los resultados de otros trabajos anteriores del equipo, definen al nervio hipogástrico ligado de gato como un buen modelo de terminación nerviosa adrenérgica gigante, libre de célula efectora.

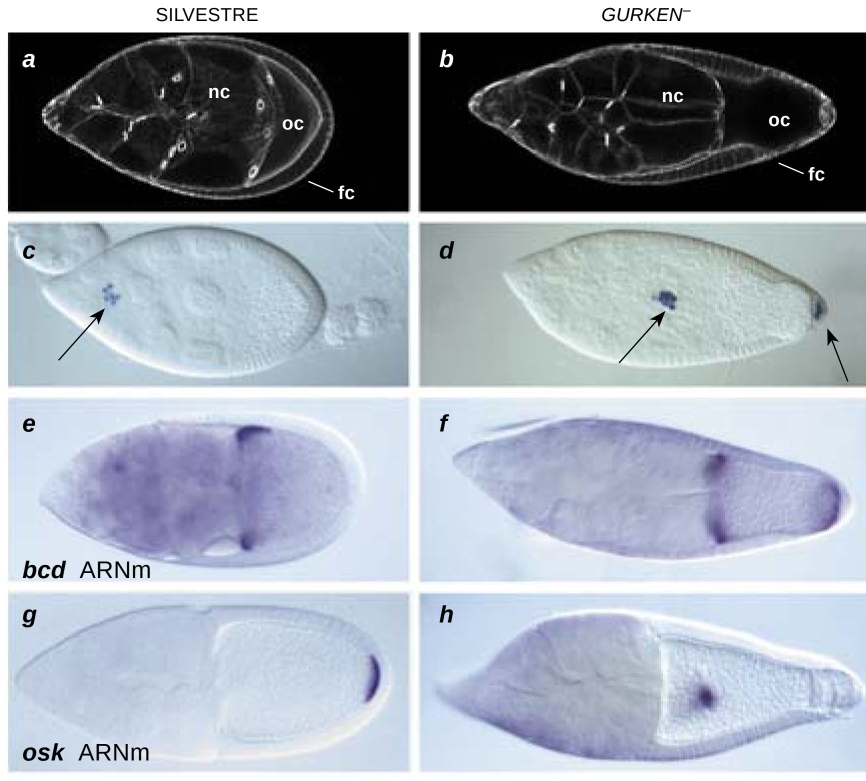
Soledad Calvo,
Carmen González-García y
Valentín Ceña
Depto. Farmacología y Terapéutica,
Instituto de Neurociencias
Universidad de Alicante

Biología del desarrollo

Cabeza y abdomen, alas y patas

Al observar una mosca es fácil percatarse de que, aparte de volar, el animal también es capaz de andar. Un análisis más atento permitirá descubrir que el insecto consta de cabeza, tórax y abdomen. O sea, que la mosca es lo que en biología del desarrollo se denomina un organismo polarizado: a lo largo de dos de sus ejes principales de desarrollo, el antero-posterior (AP) y el dorso-ventral (DV), la mosca posee distintas características que le permiten realizar funciones tan dispares como alimentarse y reproducirse, y desarrollar estructuras tan diferentes como alas y patas.

¿Cómo se origina esta polarización de los ejes AP y DV? Gracias al estudio de la mosca de la fruta, *Drosophila melanogaster*, ahora se tiene una perspectiva bastante clara de cómo ocurre este fenómeno. El proceso se inicia con la producción en los ovarios de la hembra (oogénesis) de un huevo maduro que más tarde será fecundado por el esperma del macho. El embrión que se desarrolla en el interior del huevo fecundado muestra ya desde muy joven una polaridad antero-posterior y dorso-ventral, claramente definida. El *mantenimiento* de dicha polaridad durante el resto de la embriogénesis, fase larvaria y pupación asegura un final con éxito y la producción de un adulto normal. Por tanto, el *establecimiento* de la polaridad AP y DV del embrión determina la correcta formación y funcionamiento del individuo adulto.



La actividad de gurken *es necesaria para la correcta polarización del epitelio folicular y del oocito. Las fotos representan huevos en diversos estadios de maduración teñidos con distintos reactivos. La forma y disposición de las células nutricias (nc), oocito (oc; siempre posterior a las células nutricias) y células foliculares (fc) se pone de manifiesto al visualizar los filamentos de actina con rodamina-faloidina* (fotos *a* y *b*). *Las estructuras anulares corresponden a los "canales" intercelulares que conectan las células nutricias entre sí y con el oocito. En un huevo silvestre* (c) *sólo hay un grupo de células foliculares anteriores que migran entre las células nutricias* (flecha). *En el caso de un mutante de* gurken (d) *las células foliculares posteriores también expresan el marcador anterior, señal de que se ha operado un cambio de identidad* (flechas). *Localización normal del ARNm de* bicoid *en el margen anterior del oocito* (e). *En un oocito mutante de* gurken, *el transcrito de* bicoid *se acumula en ambos polos* (f). *El ARNm de* oskar *se localiza en el margen posterior de un oocito silvestre* (g). *Por el contrario, en un oocito* gurken, *el transcrito de* oskar *se acumula en el medio* (h)

En los últimos quince años se ha descubierto que la polaridad del embrión de *Drosophila* queda establecida durante la oogénesis. En este proceso se forman grupos de 16 células que permanecen unidas por "canales" intercelulares. En cada grupo, una célula se convierte en el oocito, mientras que las otras 15 se diferencian en células nutricias, cuya función es, fundamentalmente, alimentar al oocito, la futura célula huevo. Al mismo tiempo, el cisto de 16 células se rodea por una monocapa de células llamadas foliculares.

A medida que la oogénesis progresa, el oocito madura y sufre cambios cruciales para el futuro desarrollo del embrión. Varios ARN mensajeros (ARNm) que se sintetizan en las células nutricias se transportan al oocito a través de los "canales" intercelulares. Una vez dentro del oocito, se acumulan en distintos sitios: el ARNm del gen *bicoid* se localiza en el margen anterior y el ARNm de *oskar* en el polo posterior. Como *bicoid* es el responsable del desarrollo de la cabeza y tórax del embrión, y el lugar de localización del ARNm de *oskar* establece dónde se forma el abdomen, la distribución en el oocito de los ARNm de *bicoid* y *oskar* determina el eje AP del embrión.

Un tercer ARNm, *gurken*, se concentra primero en el margen posterior, para más tarde acumularse en la esquina antero-dorsal del oocito, encima de su núcleo. Esta última localización es un requisito necesario para el desarrollo de polaridad DV en la capa de células foliculares. Como la polaridad del epitelio de células foliculares determina más tarde el eje DV del embrión, la correcta localización del ARNm de *gurken* dentro del oocito es responsable de la polarización del eje DV.

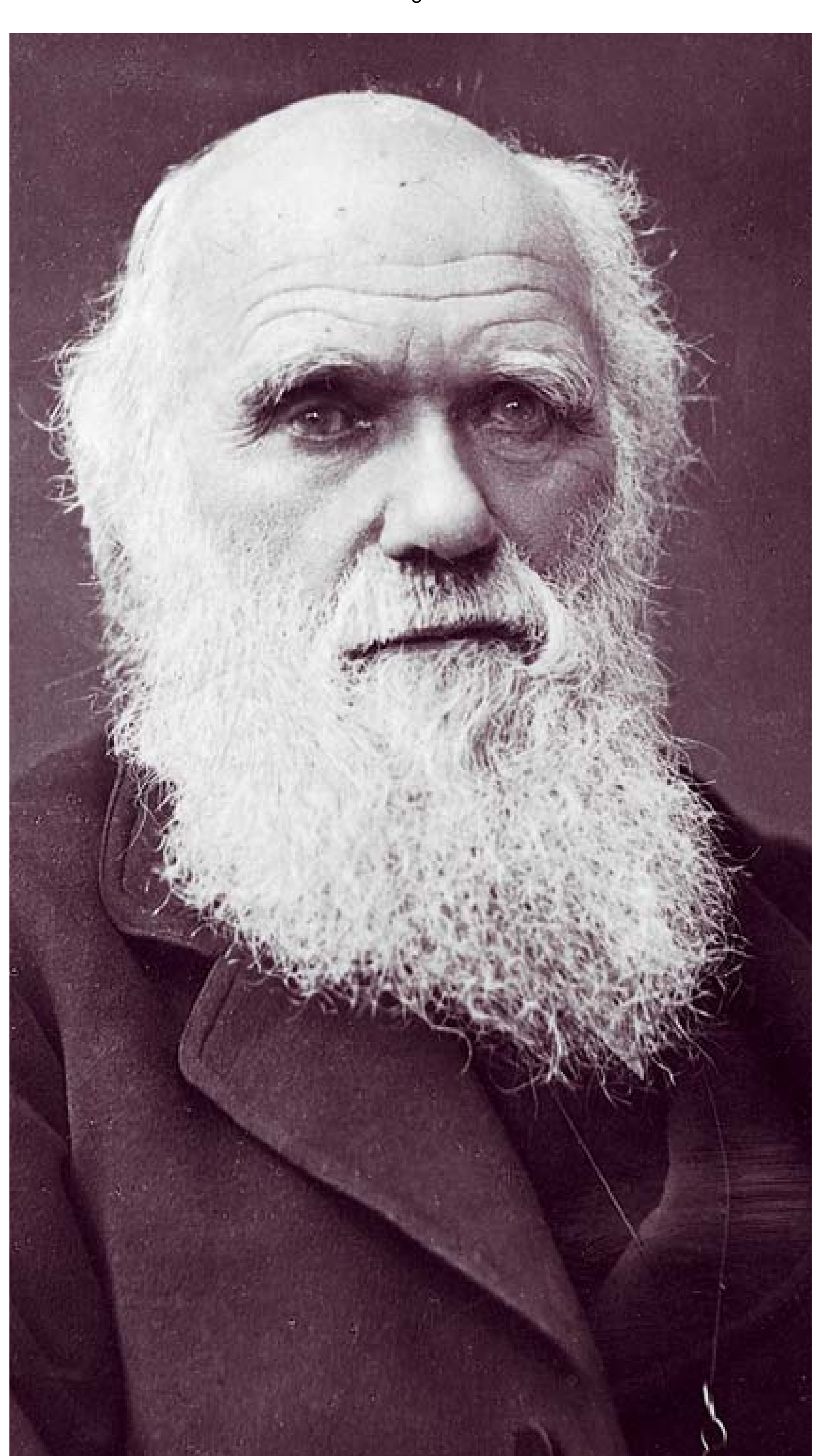
De todo lo cual se concluye que el establecimiento de la polaridad del embrión depende de la localización dentro del oocito de los ARNm de *bicoid*, *oskar* y *gurken*.

La distribución espacial de estos ARNm implica que el propio oocito debe polarizarse previamente. Por ello, la clave de la polaridad del embrión radica en entender cómo se polariza el oocito. Ahora se sabe que la localización de los ARNm de

Charles Darwin: último retrato

A pesar de lo mucho que nuestro naturalista a lo largo de toda su vida procuró aislarse, evitando las conferencias, los ágapes de homenaje y, en general, el aparecer en público y el exponerse a ser blanco de los fotógrafos, algunos de éstos supieron arreglárselas para captar la imagen de Charles Darwin. Este retrato redescubierto hace poco —adquirido recientemente por la Biblioteca Huntington en San Marino, California— se lo hizo Herbert Rose Barraud (1845-1896), un fotógrafo londinense que inmortalizó a muchas celebridades de la época victoriana. Realizado en 1881, el año anterior al de la muerte de Darwin, probablemente fue el último de cuantos se le hicieron. Ha permanecido inédito durante más de un siglo.

Gene Kritsky, entomólogo que trabaja en el Colegio del Monte de San José en Cincinnati, ha reunido más de 50 fotografías de Darwin, entre ellas una vista estereoscópica. Cuando se descubrió este retrato de la Biblioteca Huntington, el historiador de la ciencia Ralph Colp, Jr., le preguntó a Kritsky si podría identificarlo. No sólo lo identificó, sino que acotó la fecha del mismo, agregando que se trataba del último retrato del naturalista.



A quienes visitaban a Darwin solía producirles profunda impresión el rostro del biólogo, expresión cabal de su carácter. Y destacaban su mirada, penetrante y meditativa, con la agudeza y la vivacidad del hombre al que nada pudiera escapársele. Hubo quien salió convencido de haber visto "a un Sócrates redivivo... con la abovedada testa y la poderosa frente del auténtico filósofo".

En 1869 un traductor alemán le pidió a Darwin que posara para ser fotografiado junto a Alfred Russel Wallace, codescubridor de la evolución por selección natural. Darwin se negó a viajar desde su casa de campo hasta un gabinete fotográfico londinense para lo que habría sido un histórico retrato de los dos personajes. Posar ante un fotógrafo —escribió— "es cosa que odio hacer, y sería echar a perder una jornada entera, debido a mi precaria salud; y el posar con otra persona aún causaría mayores molestias y dilaciones". Sin embargo, hasta los darwinistas más fieles admiten que su héroe no gustaba de compartir el prestigio que le daba "su" teoría. El año pasado le preguntaron a John Wallace, descendiente del naturalista, si su familia tenía algún resentimiento contra Darwin por haber éste eclipsado a su socio más joven. "Si al abuelo no le importó", repuso Wallace gentilmente, "¿por qué había de importarnos a nosotros?"

Richard Milner

bicoid y *oskar* depende de microtúbulos, una especie de carreteras por las que se transportan componentes de la célula. La localización del ARNm de *gurken* depende de la posición del núcleo del oocito, lo que a su vez también requiere microtúbulos. Por tanto, la organización de los microtúbulos del oocito es el primer paso en el establecimiento de polaridad AP y DV en el embrión.

En nuestro laboratorio hemos descubierto recientemente que la organización de los microtúbulos del oocito depende de la interacción entre el oocito y el epitelio folicular. En primer lugar, el oocito manda una señal a las células foliculares que están en contacto con su margen posterior. De esta manera, este subgrupo de células foliculares adquiere un programa de desarrollo diferente del resto. Más tarde, estas células foliculares posteriores inducen al oocito a repolarizar su red de microtúbulos. Tras la reorganización de los microtúbulos a lo largo del eje AP, el oocito entonces localiza los ARNm de *bicoid* y *oskar* en polos opuestos, a la vez que traslada su núcleo al futuro margen anterodorsal, donde se acumula el ARNm de *gurken*.

Lo curioso e inesperado del caso es que la señal que originalmente manda el oocito para inducir identidad posterior a las células foliculares en contacto con él también depende de *gurken* y se correlaciona, además, con la distribución temprana de su ARNm en el margen posterior del oocito. En aquellos oocitos donde se elimina la función de *gurken*, las células foliculares del polo posterior desarrollan características anteriores, y no posteriores. Al no disponer de la contribución de las células foliculares posteriores, los microtúbulos del oocito no se reorganizan correctamente. Como consecuencia, el ARNm de *bicoid* se acumula en los dos polos, el de *oskar* lo hace en el medio del oocito y el núcleo a veces no migra correctamente.

Este hallazgo permite extraer dos conclusiones acerca de la formación de la polaridad de *Drosophila*. En primer lugar, que la mosca utiliza la misma señal entre el oocito y las células foliculares para establecer los ejes AP y DV, aunque con una diferencia temporal de varias horas y un resultado diferente en cada caso (primero *gurken* induce células foliculares posteriores, y luego dorsales). En segundo lugar, como la ubicación del núcleo del oocito y del ARNm de *gurken* en la esquina anterior-dorsal polariza el eje DV del embrión, y esta localización depende de la correcta polarización AP de la red de microtúbulos, AP es el eje primario de desarrollo, y DV el secundario. Importa mencionar a este respecto que hay vertebrados, como la rana *Xenopus*, en los que también se ha descrito que la formación del eje DV depende del establecimiento previo del eje AP.

Acaimo González-Reyes
Depto. de Genética
Universidad de Cambridge

Mundo celtibérico

Necrópolis de Carratiermes

Desde hace diez años un equipo de arqueólogos y otros especialistas viene trabajando en la excavación y estudio de la necrópolis celtibérica de Carratiermes (Montejo de Tiermes, Soria). La labor realizada abarca más de siete siglos de vida allí archivada. Los métodos empleados han sido, además del arqueológico, los propios de la anatomía, la metalografía, palinología y electromagnetismo de restos antiguos.

La historia reciente del yacimiento comienza a principios de los años setenta con hallazgos fortuitos de material celtibérico, arrastrado por las faenas agrícolas. Se emprende una primera campaña de excavación en 1977, que confirma la realidad del asentamiento. A mediados de los ochenta acuden con detectores de metales los furtivos, que cavan más de 1300 hoyos en busca de bienes arqueológicos. Ante el destrozo cometido se inician, en la primavera de 1986, los trabajos que se prolongarán de manera ininterrumpida hasta 1991.

El área excavada corresponde a un 15 % de la extensión de la necrópolis, que se calcula en unos 30.000 metros cuadrados. Ocupa espacios vacíos y otros de alta densidad de enterramientos, con tumbas de incineración datables entre los siglos VI a.C. y I d.C., que cubren los períodos protoceltibérico, celtibérico pleno y celtibérico tardío. Las labores de excavación han documentado 38.300 restos de cerámica, metal y sílex; de ellos sólo una sexta parte se encontraba *in situ* en las tumbas, prueba de la destrucción y remoción causada por el arado y los furtivos.

Se han identificado 644 estructuras funerarias con sus ajuares, estelas, agrupaciones, orientaciones espaciales y otros datos de interés histórico. Durante los trabajos se localizó, bajo



Tumba 92 de Carratiermes durante el proceso de excavación. Corresponde a un ajuar de piezas de bronce, dentro de urna a mano

una zona de la necrópolis, un poblado de la Edad del Bronce, con restos de postes de cabañas y silos, lo que retrotrae la cronología de habitación humana en Tiermes al siglo XVIII-XVII a.C. Con toda esa información podemos esbozar un cuadro sobre la forma de vida y la técnica de los pueblos celtibéricos, así como el medio que habitaban.

Por lo que concierne al mobiliario se distinguen dos tipos: el ajuar de armas y el ajuar civil. El ajuar de armas era propio del guerrero, aunque no se trataba de un atributo exclusivamente masculino; se ha hallado también en cremaciones femeninas o de mujer con niño. El ajuar civil se refiere a los enseres. El material de base empleado era bronce y cerámica. Destacan los pectorales de bronce, espiraliformes y de placa.

Se ha estudiado más de 110 kilogramos de huesos cremados, extraídos de la excavación de 474 tumbas individuales y 28 dobles, lo que supone un análisis de 530 individuos, repartidos varones y mujeres en casi igual proporción. Es frecuente la presencia simultánea de huesos cremados humanos y huesos animales, quizá restos del banquete funerario. Hay otras tumbas donde sólo quedan huesos animales o ningún tipo de resto óseo.

El análisis de los fragmentos óseos aporta un porcentaje significativo de cremaciones dobles, principalmente mujeres con niño (feto, recién nacido o niño de algunos años). Existen cremaciones conjuntas de varón y hembra adultos, e incluso de niños. Por los exámenes óseos sabemos que el promedio de vida de la población estudiada oscila en torno a los 30 o 35 años. La mortalidad relativa de las mujeres jóvenes era alta, quizá por parto.

Los análisis histológicos detectan problemas de abrasión dental con la edad, probablemente derivados de la alimentación, y ausencia de caries. Aunque hay casos de artrosis en los individuos de edad avanzada, los celtíberos eran de complexión fuerte y sana, con excelente calcificación de jóvenes y adultos. La dieta parece haber sido rica en calcio y vitamina D, con suficiente consumo de vegetales y proteína animal, ésta derivada de la caza.

El análisis metalúrgico de las muestras revela que los celtíberos empleaban el proceso de endurecimiento del hierro mediante el enfriamiento brusco a partir de la temperatura de forja (tratamiento térmico de temple). Se confirma así lo relatado por las fuentes clásicas. El nivel de control que ellos obtenían sobre el contenido de carbono y sobre la conformación no ha podido superarse hasta el siglo XIX, lo que habla muy bien de su habilidad metalúrgica. Los hierros estudiados corresponden a los hierros pudelados antiguos, caracterizados por la presencia de escorias y la variabilidad del tamaño de grano. Ciertas contaminaciones de cobre en hierros sugieren que se utilizaban a veces los mismos hornos.

Se ha analizado el polen encontrado en las tumbas para conocer el paisaje vegetal contemporáneo. Dominaban los arbustos y hierbas; entre éstas abundaban gramíneas y leguminosas. No cultivaban los cereales. Había pinos, sabinas, enebros, robles, encinas y otras especies arbóreas.

José Luis Argente Oliver
Museo Numantino, Soria

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Tortuga de Florida



Las tortugas acuáticas abundan en los trópicos. En número y diversidad. De la tortuga de Florida (*Trachemys scripta*), por ejemplo, se conocen al menos 14 subespecies. (Curiosamente la que, bajo ese nombre, venden en España las tiendas de acuario, es la subespecie de Louisiana y no la de Florida. Esta última extiende su zona de habitación desde el sudeste de Virginia hasta el Brasil. Busca aguas dulces, tranquilas si es posible, aunque no desdeña las corrientes del trópico. Se adentra en los fondos blandos, de rica vegetación, donde halla alimentos muy variados. De hábitos carnívoros en su juventud, cuando se alimenta sobre todo de renacuajos, crustáceos anfípodos e insectos, con la edad aumenta su dieta herbívora de lentejas de agua, algas y otras plantas acuáticas, que conjuga con la caza de caracoles, peces y otros animalillos. En breve, come cuanto tiene a su alcance para mantener el medio metro largo que miden los adultos.

Se las ve tomando el sol fuera del agua aposentadas en atalayas desde donde puedan avizorar los depredadores: playas, troncos y rocas. La tortuga de Florida tiene especial querencia por los solanares. En los puntos predilectos, pueden apilarse varios ejemplares, uno encima del otro.

Estábamos en un marjal de Chiapas, en el sur de México, cuando descubrimos el tronco tumbado sobre el agua mientras un par de tortugas trepaban. Casi siempre, las tortugas acuáticas viven en grupos; por tanto, sabíamos que, para que emergieran más individuos, bastaba con aguardar. Instalamos los trípodes con teleobjetivos medios; uno de nosotros con encuadre vertical y el otro, horizontal. Sentados a la sombra, en completo silencio y movimientos lentísimos, esperamos a que el tronco se cubriera de inquilinos, y apretamos el disparador.



Los dedos de sal del océano

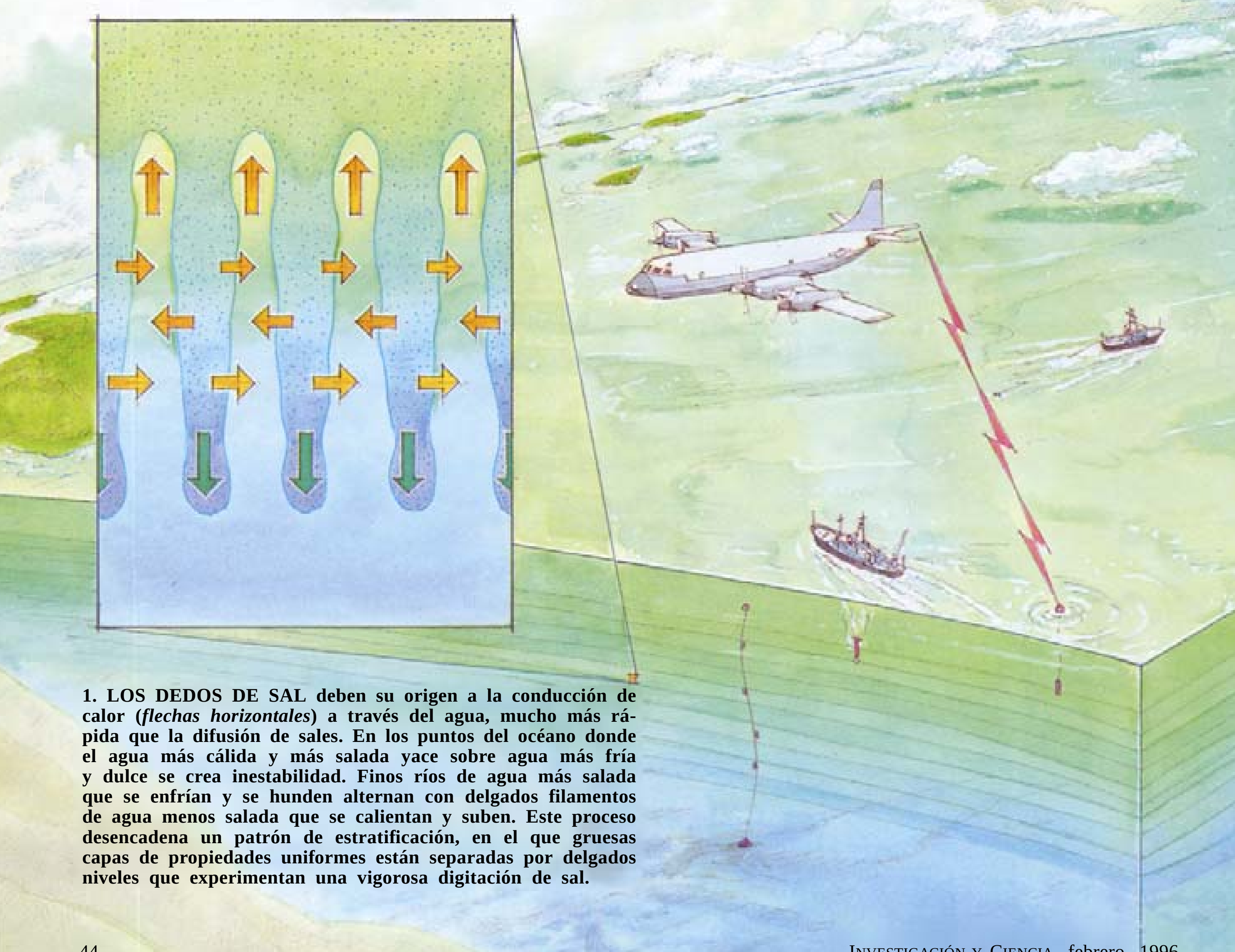
Cierta singularidad desarrollada a pequeña escala, relativa al modo en que se mezcla el agua del mar, puede tener consecuencias a gran escala para la estructura del océano

Raymond W. Schmitt, Jr.

A mediados de los cincuenta, Henry M. Stommel y Arnold Arons, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, de pie ante una pizarra trataban de dar con un modo de medir la presión reinante en el fondo del mar. En su desesperación, pensaron incluso en la construcción de una manguera de cinco kilómetros de largo, que, lanzada desde la superficie, extrajera el agua más profunda del océano. El agua es menos salada en el fondo que en la superficie; por tanto, la columna de agua del interior del tubo, tras alcanzar el equilibrio térmico, sería más ligera, y alcanzaría así una altura mayor, que el agua de la superficie oceánica.

Stommel y Arons imaginaron que podrían medir fácilmente cambios de presión en la base de este tosco instrumento observando las subidas y bajadas de nivel del agua en el tubo. Fijo ante el dibujo, centrado en el problema de medir la presión, a Arons se le ocurrió de repente una extraña idea. Añadió un grifo sobre la boca superior del tubo del dibujo: "Si abrimos la espita manará incesantemente", dijo.

Stommel llamó a ese experimento mental "la fuente de sal perpetua". Para corroborar la viabilidad de la idea, crearon un modelo de fuente de sal en el laboratorio. Se aprestaron luego a fabricar una fuente de sal



1. LOS DEDOS DE SAL deben su origen a la conducción de calor (*flechas horizontales*) a través del agua, mucho más rápida que la difusión de sales. En los puntos del océano donde el agua más cálida y más salada yace sobre agua más fría y dulce se crea inestabilidad. Finos ríos de agua más salada que se enfrían y se hunden alternan con delgados filamentos de agua menos salada que se calientan y suben. Este proceso desencadena un patrón de estratificación, en el que gruesas capas de propiedades uniformes están separadas por delgados niveles que experimentan una vigorosa digitación de sal.

real en el mar, pero sus esfuerzos por lograr una demostración a gran escala del modelo dieron resultados ambiguos.

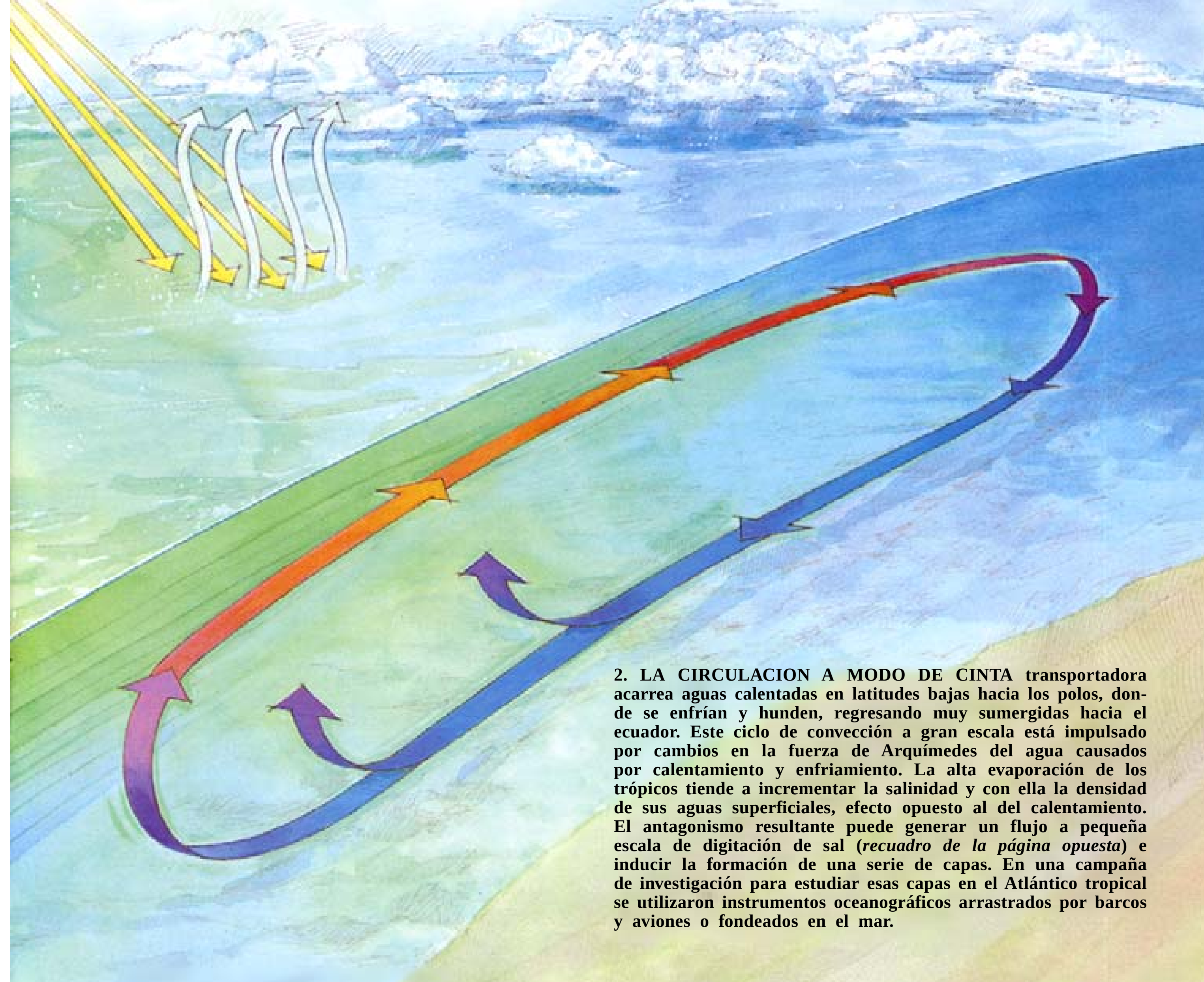
La fuente de sal de Stommel y Arons hubiera quedado arrumbada entre las curiosidades oceanográficas de no haber mediado Melvin E. Stern. Unos años más tarde, éste se percató de que el océano era muy capaz de producir fuentes de sal por sí mismo. Advirtió que, en el mar, la conducción de calor centuplica la velocidad de difusión de sales disueltas. Lo que significa que una extensión de agua del océano puede conseguir el equilibrio térmico con sus vecinas mucho antes que el equilibrio químico resultante de compartir las sales disueltas. Por tanto, extensiones de agua adyacentes pueden diferir significativamente en su salinidad, aun cuando no se interponga ninguna barrera física (como la pared de una tubería), diferencias que pueden desencadenar el movimiento del fluido. Este fenómeno acontece sólo a una escala de pocos centímentros (alcance de la conducción efectiva de calor); de ahí que los oceanógrafos denominen dedos de sal a los cursos alargados y formados mediante ese proceso.

Existe el convencimiento de que la comprensión de los dedos de sal y el alcance de su influencia planetaria constituye una premisa necesaria para elaborar con precisión un modelo de la temperatura y la salinidad del océano. Tales avances ayudarán a determinar muchos parámetros críticos aún mal conocidos; por ejemplo, el ritmo con que la mezcla oceánica redistribuye el dióxido de carbono, los contaminantes y el calor.

El Sol calienta más la Tierra cerca del ecuador que en los polos, pero el océano trabaja vigorosamente para corregir la desigual distribución de calor. Las aguas cálidas fluyen hacia los polos desde los trópicos a lo largo de la superficie del océano, al tiempo que las aguas frías de altas latitudes se hunden y regresan al ecuador a grandes profundidades.

Este inmenso sistema convectivo funciona porque el agua fría es más densa que la cálida. Ahora bien, hay en el océano un factor de complicación: la presencia de sal disuelta capaz de producir cambios de densidad no menos importantes. La salinidad del agua varía de un sitio a otro en virtud de dos fenómenos estrechamente relacionados. La evaporación extrae agua dulce de la superficie del océano y deja una concentración más alta de sales, lo que incrementa la densidad del agua que queda. Por contra, la precipitación diluye el agua marina y rebaja su densidad.

Los cambios de densidad local que resultan de la evaporación y la preci-



2. LA CIRCULACION A MODO DE CINTA transportadora acarrea aguas calentadas en latitudes bajas hacia los polos, donde se enfrían y hunden, regresando muy sumergidas hacia el ecuador. Este ciclo de convección a gran escala está impulsado por cambios en la fuerza de Arquímedes del agua causados por calentamiento y enfriamiento. La alta evaporación de los trópicos tiende a incrementar la salinidad y con ella la densidad de sus aguas superficiales, efecto opuesto al del calentamiento. El antagonismo resultante puede generar un flujo a pequeña escala de digitación de sal (*recuadro de la página opuesta*) e inducir la formación de una serie de capas. En una campaña de investigación para estudiar esas capas en el Atlántico tropical se utilizaron instrumentos oceanográficos arrastrados por barcos y aviones o fondeados en el mar.

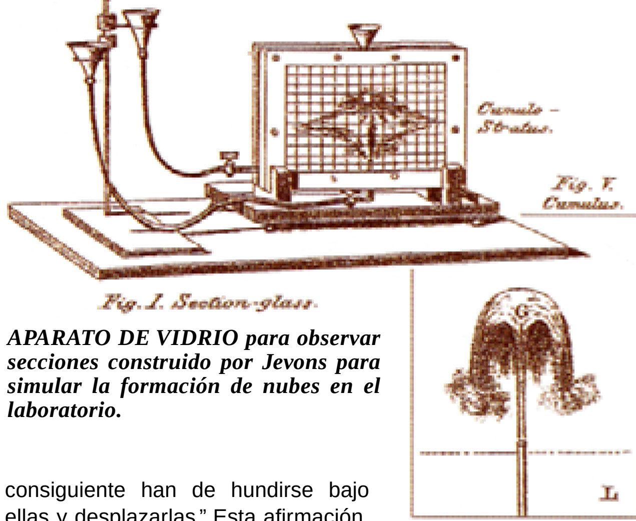
Descubrimiento frustrado en el siglo XIX

Me sentí atraído por dos investigadores que estuvieron a punto de desentrañar los principios físicos de los dedos de sal mucho antes de que los descubriera Melvin E. Stern en las postrimerías de los años cincuenta. El primero que se ocupó del problema fue W. Stanley Jevons. En su juventud, este economista británico pasó cinco años en Australia, donde se interesó por distintas ramas del saber, incluida la meteorología.



W. STANLEY JEVONS en Australia a los 22 años.

Su curiosidad por la formación de nubes le movió a realizar cierto experimento, en el que colocó una capa de agua caliente azucarada encima de agua fría pura. En un artículo que en 1857 le publicó *Philosophical Magazine*, afirmaba que había observado una "infiltración de ríos minúsculos como hebras". Jevons había creado dedos de azúcar y rozó la explicación de su formación. "Pero las partes de esos estratos que se hallan inmediatamente en contacto pronto se intercambian calor y tienden a adquirir una temperatura media; y es evidente que, donde eso ocurre, las porciones de líquido que contienen azúcar deben siempre ser ligeramente más densas que las puras, y por consiguiente han de hundirse bajo ellas y desplazarlas." Esta afirmación, con su comprensión implícita de que el calor se difunde más deprisa que las sustancias disueltas, constituye una explicación razonable de los dedos de sal. Pero



APARATO DE VIDRIO para observar secciones construido por Jevons para simular la formación de nubes en el laboratorio.

pitación tienden a oponerse al patrón planetario de calentamiento y enfriamiento. Es decir, la mayor evaporación en latitudes bajas incrementa la salinidad y la densidad subsuperficiales, mientras que la mayor precipitación en latitudes altas reduce aquellas dos propiedades.

Este patrón desencadena cierto antagonismo entre los efectos de la temperatura y los de la salinidad en la superficie oceánica. En la mayoría de los lugares, el océano es gravitatoriamente estable, con el agua más ligera y cálida situada encima de la más pesada y fría. Pero el gradiente de sal del océano (considerado al margen de su gradiente térmico) va decididamente de arriba abajo (mayor densidad arriba). La precaria distribución de salinidad sobrevive en la mayoría de los lugares en virtud de la estabilizadora influencia de la temperatura.

RAYMOND W. SCHMITT, JR., inició su formación en la Universidad Carnegie Mellon y obtuvo su doctorado en oceanografía física por la de Rhode Island. En 1978 entró como becario postdoctoral en la Institución Oceanográfica Woods Hole, donde desarrolla hoy su labor investigadora.

Sin embargo, según la teoría de Stern, allí donde la diferencia de salinidad entre capas someras y capas profundas adquiere cierto valor debería iniciarse un flujo a modo de fuente entre niveles adyacentes. Cálculos y experimentos de laboratorio muestran que tales flujos, cuando alcanzan pleno desarrollo, forman una suerte de cascada regular de filamentos verticales largos y finos, que en sección horizontal aparecen en forma de celdillas cuadradas.

Con esa base teórica, a mediados de los setenta los oceanógrafos empezaron a buscar pruebas directas de dedos de sal en el mar. Se escogió el Atlántico nororiental, donde puede detectarse agua mediterránea a profundidades de más de un kilómetro. (Se trata de aguas muy saladas, ya que en el Mediterráneo la evaporación excede en mucho la precipitación.) El agua que sale por el estrecho de Gibraltar avanza hacia el oeste, se hunde y se desparrama por el Atlántico.

En una campaña de los años setenta para detectar dedos de sal, Bruce A. Magnell arrastró un instrumento especial por el nivel de agua mediterránea del Atlántico. El aparato contenía sensores únicos de respuesta rápida que podían revelar cambios térmicos y de salinidad de pequeña escala a través de las digitaciones de sal. Desde el mismo barco, Albert J. Williams desplegó un aparato óptico de caída libre que permitía visualizar la variación de índices de refracción causada por las digitaciones. Ambos métodos aportaron pruebas de la existencia de las esperadas fluctuaciones a escala centimétrica en la transición entre el agua mediterránea y la atlántica. Las fuentes de sal, aunque minúsculas, existían en la naturaleza.

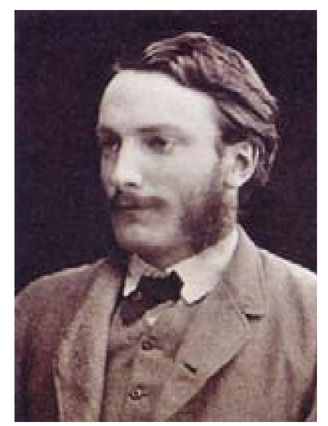
El éxito del trabajo inicial a bordo impulsó otros estudios sobre dedos de sal. Desde un submarino, Thomas R. Osborn observó que podía producirse cierta forma asimétrica de digitación de sal: halló estrechas plumas descendentes de agua cálida y salada rodeadas de anchas plumas ascendentes. Aunque la teoría avala tales dedos, nadie ha identificado todavía el mecanismo responsable de que se forme la geometría asimétrica.

Mi familiaridad con los dedos de sal se basa en ensayos de laboratorio, reflexión teórica y campañas oceanográficas. La más ambiciosa de éstas se desarrolló a miles de millas de Gibraltar, junto al mar Caribe. El gradiente vertical de salinidad en la región es especialmente favorable a la formación de digitaciones y aquí, al igual que en el caso del derrame mediterráneo en el Atlántico, el océano presenta una muy curiosa estructura de saltos térmicos y de salinidad que se observan conforme descendemos en

se desvió luego del camino recto al simplificar demasiado los principios físicos involucrados y suponer que toda convección ocurriría en "minúsculos riachuelos".

Jevons regresó a Gran Bretaña, donde adquirió gran prestigio por sus conocimientos en economía y lógica. Su carrera quedó truncada al morir prematuramente, ahogado, a los 47 años.

Se presentó una nueva oportunidad de descubrir las bases físicas de los dedos de sal en 1883, cuando Lord Rayleigh (John William Strutt) publicó un análisis teórico de los experimentos de Jevons en un artículo titulado "Investigación del Carácter del Equilibrio de un Fluido Pesado Incompresible de Densidad Variable." Allí, el eximio físico británico aportaba un tratamiento matemático del movimiento en fluidos estratificados. Pero Raylegh no consideró el papel de la difusión, con lo que perdió la oportunidad de comprender cómo funcionan los dedos de sal. Lo que sí formuló fueron las condiciones para la inestabilidad más simple Raylegh-Taylor, hoy conocida por su importancia en dinámica de plasmas y explosiones de supernovas.



JOHN W. STRUTT a los 28 años, tres años antes de que sucediera a su padre como tercer barón de Rayleigh.

La única alusión de Rayleigh sobre el trabajo precursor de Jevons es una breve nota al pie de página en su artículo de 1883, en la que también afirma que él mismo había llegado ya a la teoría en 1880. Intrigado por la cronología y la motivación del trabajo de Rayleigh, he examinado recientemente sus manuscritos originales, archivados en la base aérea de Hanscom, en Massachusetts. Un bloc de notas de laboratorio en poder de la ayudante de Rayleigh, su cuñada Eleanor Sidgwick, revela que también ambos realizaron un experimento de dedos de azúcar, en el laboratorio Cavendish de Cambridge, en abril de 1880. Sidgwick escribía: "Repetimos varias veces el experimento de W. S. Jevons (véase *Phil. Mag.*, julio 1857) sobre la formación de nubes cirros... Los efectos obtenidos se parecieron a los que él describió... En todos los casos además, las extremidades de los filamentos se expandieron en forma de seta". Curiosamente, en el artículo de Rayleigh de 1883 no se hace mención alguna a esos experimentos.

Rayleigh, quien más tarde recibiría el premio Nobel por el descubrimiento del argón, fue un teórico pespicaz y un hábil experimentalista. Pero, a pesar de haber leído las hipótesis de Jevons y haber duplicado sus experimentos, no logró identificar el papel de la conducción del calor en la formación de dedos de sal. Tal vez hubiera llegado a entenderlo discutiéndolo con Jevons (ambos eran miembros de la Regia Sociedad) si éste no hubiera muerto prematuramente. El descubrimiento de la física de los dedos de sal tuvo que esperar casi un siglo. *—R.W.S.*

la columna de agua. Por lo general, el océano superior muestra una variación continua de temperatura, desde la capa superficial cálida soleada a la fría y oscura de las profundidades abisales. Los oceanógrafos denominan termoclina principal a esta transición gradual de temperatura.

Sin embargo, según todas las mediciones recabadas desde que los oceanógrafos las han podido obtener aquí (las de los últimos 25 años), la termoclina dista mucho de ajustarse a una curva suave. La disminución de la temperatura con la profundidad se produce a través de una serie de peldaños, cada uno de entre cinco y 40 metros de grosor. Estas escalinatas termohalinas, así se llaman tales estructuras, muestran los cambios escalonados de temperatura y de sales haluro. Como si se tratara de vastos estratos geológicos, podemos seguir las diversas capas de temperatura y salinidad uniforme a lo largo de centenares de kilómetros. Es difícil imaginar cómo unos accidentes tan regulares pueden sobrevivir en un océano en incesante agitación. ¿Por qué no destruyen en seguida ese patrón escalonado los remolinos y ondas internas (el turbulento "tiempo" del océano)? ¿Qué extraño proceso sostiene tal ziggurat submarino?

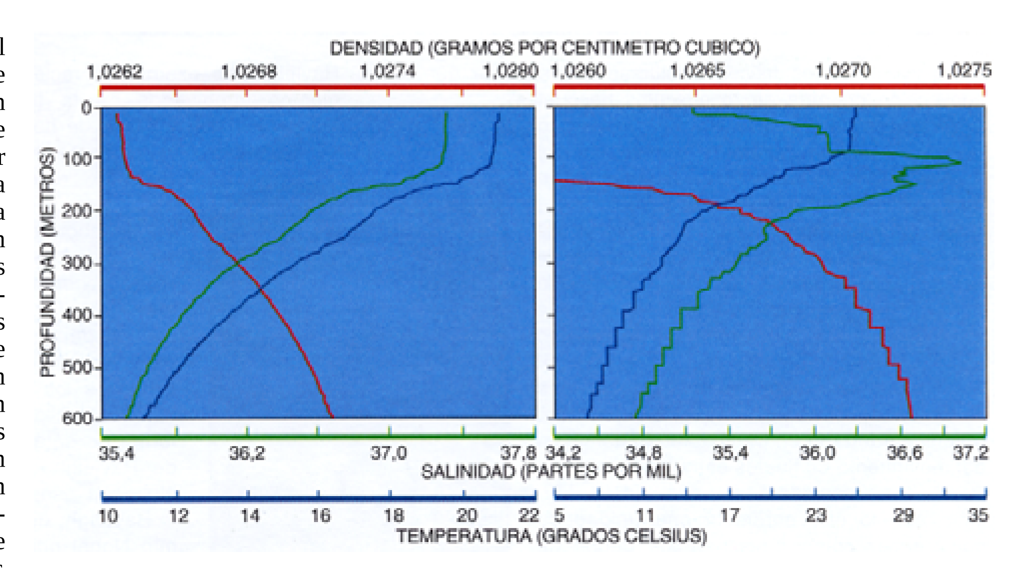
La respuesta de ese misterio oceanográfico la tienen los dedos de sal. En éstos, el movimiento de agua transporta sal hacia abajo. Con los filamentos de sal baja además calor, si bien éste también se propaga lateralmente hacia el agua de las inmediaciones. El movimiento reduce el gradiente vertical normal térmico y el de salinidad. Lo llamativo del caso se refiere a la densidad global del agua: se ve afectada de manera opuesta, es decir, el océano desarrolla *mayores* diferencias de densidad cuando forma digitaciones. Ello se debe a que los dedos transportan más sal que calor, acción que rebaja todavía más la densidad del agua superior (ya de por sí ligera) e incrementa la densidad de la más pesada agua inferior. El resultado parece ser contraintuitivo: la mezcla ordinaria causada por turbulencia actuaría reduciendo el gradiente de densidad, no incrementándolo.

El peculiar flujo de densidad de la digitación comporta una consecuencia que explica con nitidez la estructura escalonada observada en el Atlántico tropical y otras áreas. Contrariamente a lo que cabe esperar de la mezcla ordinaria mediante turbulencia al azar que tiende a suavizar las irregularidades iniciales del perfil de densidad, la mezcla mediante dedos de sal las refuerza. En zonas donde el gradiente de densidad cambia de forma brusca, el cambio puede hacerse más drástico todavía. Estos lugares experimentan el máximo flujo de densidad, que adquiere magnitud suficiente para reducir la variación de densidad en regiones adyacentes. Como resultado, el océano superior se organiza en capas de temperatura y salinidad bastante uniformes y separadas por láminas, o niveles de tránsito, de gradientes altos. Las capas contienen flujos convectivos de gran escala; los niveles de tránsito están entrelazados por dedos de sal.

Las escalinatas termohalinas las observaron Stern y J. Steward Turner, a finales de los sesenta. Por la misma época, otros empezaron a detectar escalinatas en el océano, con instrumentos electrónicos preparados para registrar la temperatura y salinidad en su descenso por la columna de agua. Pero hasta hace muy poco no se consiguió articular un guión coherente del funcionamiento interno de esas estructuras.

En 1985 mis colegas y yo tuvimos la oportunidad de estudiar una vasta extensión de escalinatas en el Caribe. Subvencionaban nuestro programa la Fundación Nacional para la Ciencia y la Oficina de Investigación Naval. Le impusimos el acrónimo C-SALT (de "Caribbean Sheets and Layers Transects", es decir, "Transectos de láminas y capas del Caribe").

Antes de empezar la campaña, Janice D. Boyd había determinado, con los datos oceanográficos dispo-



3. PERFILES OCEANOGRAFICOS, donde se pone de manifiesto un cambio gradual característico entre la capa superficial, más cálida y salada, y las aguas frías, menos saladas, subyacentes (*izquierda*). En la zona de transición, los dedos de sal pueden crear cambios escalonados de temperatura y salinidad que muestran una notoria regularidad (*derecha*).

nibles, la presencia habitual de estructuras escalonadas de temperatura y salinidad en una vasta extensión al este de Barbados. Para explorar la región organizamos una flota de observación integrada por aviones y barcos, amén de instrumentos estacionarios fondeados. La primera sorpresa agradable con que nos encontramos fue la enorme extensión del sistema. Un área de más de un millón de kilómetros cuadrados nos dio perfiles escalonados en nuestras mediciones. Podían distinguirse 10 capas características. No esperábamos que unos accidentes tan pequeños (cada uno de unos 30 metros de grosor) pudieran seguirse a lo largo de centenares de kilómetros.

Otro descubrimiento que también concernía al sistema escalonado fue el del modo de variación, en las distintas capas, de la temperatura y la salinidad. Los estratos submarinos en cuestión eran más fríos y densos en el sur y más cálidos y salados en el norte. Este patrón encaja con lo que puede observarse en el laboratorio cuando se deja que las capas se desvanezcan con el tiempo. Apoyados en nuestras mediciones dedujimos que los cambios de las propiedades físicas representan la resultante entre el flujo horizontal en el seno de cada capa y diferencias en los flujos verticales a través de los niveles de separación del techo y del piso.

La documentación que recogimos sobre la variación de tales propiedades, altamente coherente con la zona de ubicación, proporcionó una importante clave que señalaba a los dedos de sal como los responsables del mantenimiento de las escalinatas. Observamos, pues, que en cualquier capa considerada los cambios de salinidad eran mayores que los de temperatura. Ningún otro proceso de mezcla, fuera de las digitaciones, podría haber generado tal desequilibrio. De hecho, la tasa medida entre variaciones de salinidad y temperatura se aproximó mucho a la esperada, a tenor de experimentos de laboratorio y predicciones teóricas. Nuestro estudio de estructuras escalonadas en la termoclina había confirmado que los dedos de sal constituían el mecanismo dominante de mezcla en la región y estábamos muy ilusionados con el descubrimiento de que el comportamiento del mezclado a pequeña escala se ratificaba en la estructura térmica y salina a gran escala del océano.

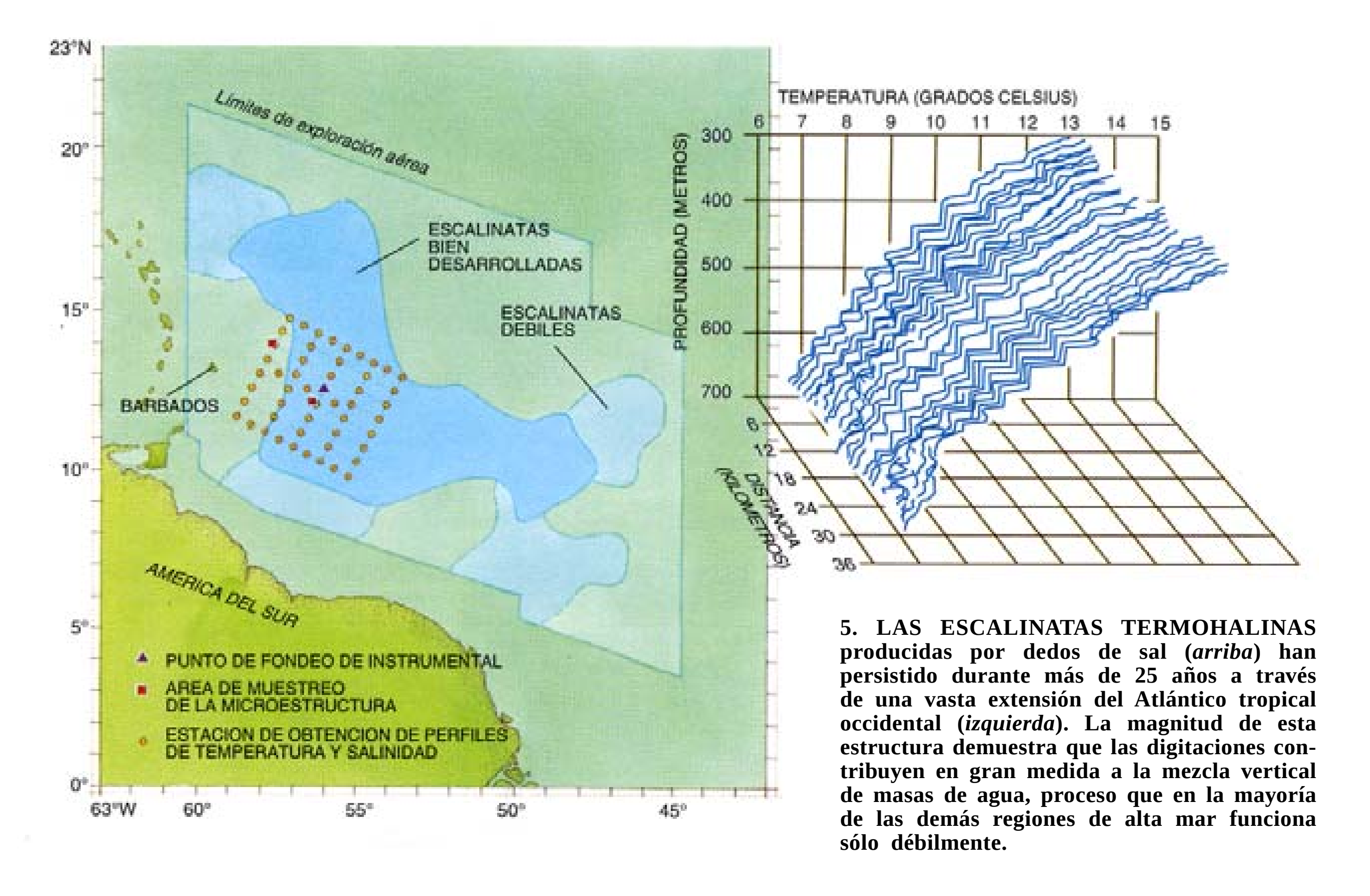
Durante los estadios finales de C-SALT nos dedicamos a medir tasas de mezcla desde dos buques. En uno, Michael C. Gregg y Thomas B. Sanford, junto con Williams y el autor, desplegaron instrumentos que podían registrar perfiles de temperatura y salinidad en su caída libre. Rolf G. Lueck arrastró con la corriente un aparato que medía la turbulencia. Desde el otro barco, George O. Marmorino y sus colaboradores extendieron una ristra de sensores preparados para cartografiar la estructura térmica de la escalinata y también para detectar los efectos a pequeña escala de los dedos de sal.

Encontramos un patrón parecido de variaciones térmicas bastante regulares en los niveles de contacto entre capas, patrón completamente distinto de la puntiaguda rúbrica de la turbulencia. La escala de las ondulaciones observadas correspondió a una celda de tres centímetros, tamaño concorde con la teoría de los dedos de sal. Los datos obtenidos a partir de los sensores de temperatura arrastrados por la marina revelaron, además, la existencia de plumas convectivas que operaban en las capas mezcladas. En su desenvolvimiento, el océano parecía seguir los patrones observados en el laboratorio.

De todos modos, la intensidad del proceso de mezclado mediante dedos de sal que encontramos durante C-SALT resultó algo inferior al vigor



4. DEDOS PURPURA se desarrollan cuando agua cálida salada con permanganato potásico (que actúa como sal disuelta y marcador de color intenso) flota en agua dulce fría.



5. LAS ESCALINATAS TERMOHALINAS producidas por dedos de sal (*arriba*) han persistido durante más de 25 años a través de una vasta extensión del Atlántico tropical occidental (*izquierda*). La magnitud de esta estructura demuestra que las digitaciones contribuyen en gran medida a la mezcla vertical de masas de agua, proceso que en la mayoría de las demás regiones de alta mar funciona sólo débilmente.

esperado. También nos sorprendió que el aparato óptico de Williams mostrara que los dedos estaban inclinados a causa de los cambios de velocidad (cizalla) entre capas. Este mezclado más débil parece deberse al grosor de los niveles comprendidos entre las capas, grosor que alcanzó algunos metros y no las decenas de centímetros, como habíamos imaginado a la luz de los experimentos de laboratorio. Modelos físicos más refinados desarrollados recientemente por Eric Kunze explican las variaciones de grosor y los efectos de la cizalla vertical en los dedos de sal del océano.

Las mediciones efectuadas durante C-SALT también arrojaron luz sobre una importante diferencia termodinámica entre los dedos de sal y la turbulencia oceánica. Cuando lo que produce mezcla en el océano superior es la turbulencia resultante del oleaje y los remolinos, ésta distorsiona la distribución normal de temperatura, por cuanto convierte parte de la energía cinética de los movimientos superficiales en energía potencial de la estructura térmica (elevación de brazos de agua densos y hundimiento de los ligeros). Con todo, parte de esta energía cinética se disipa en forma de calor. Los dedos de sal también mezclan extensiones de agua ascendentes y descendentes. Pero el desarrollo de digitaciones apenas disipa calor, por lo que la mezcla vertical que permite supera en cinco a veinte veces la de la turbulencia, para una pérdida energética equivalente.

Las escalinatas encontradas durante las expediciones de C-SALT ocupan una extensión enorme (el 25 % del área del Atlántico entre 10 y 15 grados norte de latitud). Nuestros cálculos nos inducen a pensar que el mezclado de sales en esta región se realiza a una tasa unas diez veces mayor que fuera de ella, donde sólo ocurre una mezcla débil. Por tanto, las escalinatas halladas durante las campañas C-SALT pueden proporcionar una vía crítica para la transferencia vertical, en el océano, de sal, oxígeno, nutrientes e incluso de contaminantes de reciente introducción.

Las aplicaciones vinculadas al progreso en el conocimiento de los dedos de sal no se limitan al cálculo de la respuesta del océano al cambio ambiental. Se ha sugerido que las estructuras largas y estrechas halladas en coladas basálticas (llamadas diaclasado columnar) son resultado de un tipo de digitación de basalto producida en el interior del magma que se enfría. De acuerdo con los experimentos en vidrios fundidos que acaban de llevar a cabo Yan Liang, Frank M. Richter y E. Bruce Watson, se confirma que en tales fluidos viscosos pueden desarrollarse dedos. También se forman dedos en aleaciones de metales, lo que provoca defectos de moteado y de resistencia en moldes enfriados desde abajo.

Asimismo, puede generarse mezclado por digitaciones en estrellas y en las atmósferas de planetas gaseosos. ¿Descubrirán las sondas espaciales análogos extraterrestres de las escalinatas C-SALT cuando exploren las atmósferas de Júpiter y Saturno? Mientras llega la respuesta, podemos ahondar en este fascinante fenómeno físico a través del estudio continuado del magnífico laboratorio de fluidos de la Tierra, su océano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OCEAN CIRCULATION PHYSICS. Melvin E. Stern. Academic Press, 1975.

BUOYANCY EFFECTS IN FLUIDS. J. S. Turner. Cambridge University Press, 1975.

DOUBLE DIFFUSION IN OCEANOGRAPHY. R. W. Schmitt en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 26, páginas 255-285; 1994.

Así protege la leche de la madre al recién nacido

Algunas de las moléculas y células presentes en la leche materna contribuyen de una manera eficaz a prevenir las infecciones en el recién nacido

Jack Newman

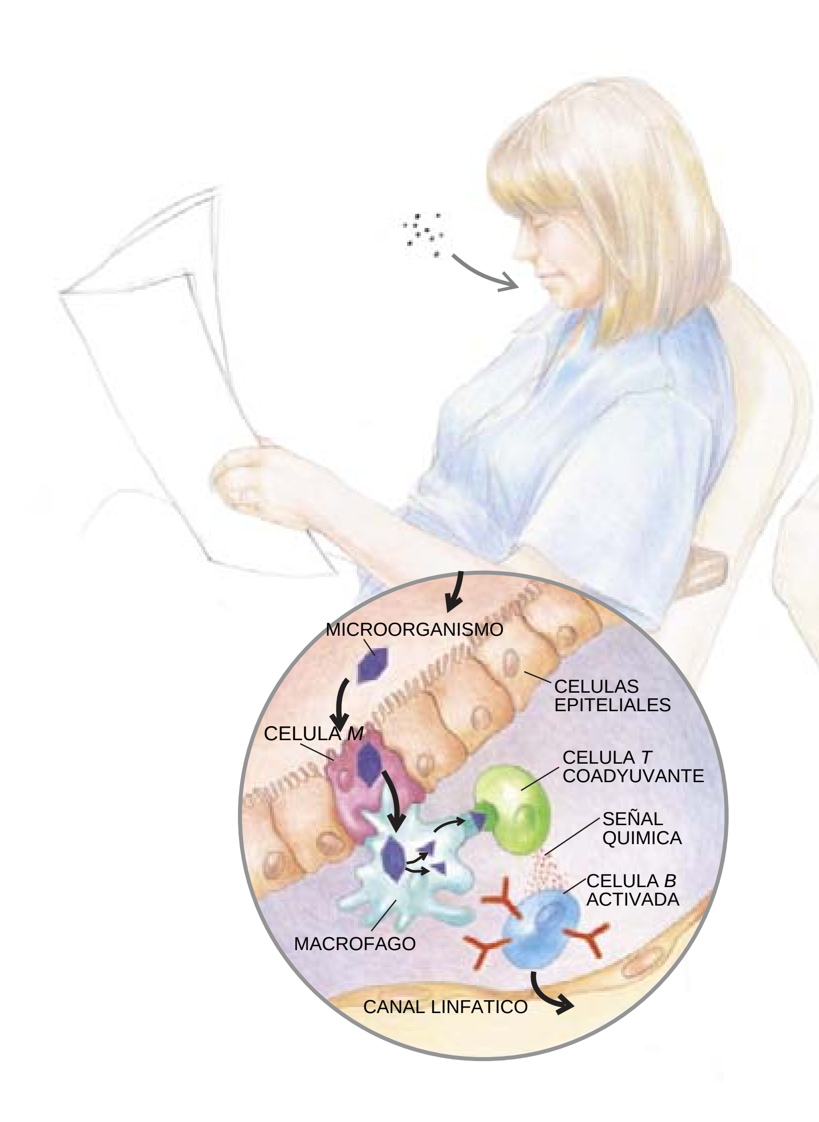
Los médicos saben desde hace tiempo que los recién nacidos que reciben lactancia natural contraen menos infecciones que los que se alimentan de biberón. Hasta hace poco, suponíase que los niños amamantados corrían mejor suerte, en lo que se refiere a las infecciones, porque la leche de la madre estaba libre de bacterias, en tanto que la leche artificial, que debía diluirse en agua e introducirla en el biberón, se contaminaba fácilmente. Por mucho que se esterilizara la leche artificial, los niños con sólo ella alimentados eran más proclives a padecer meningitis, otitis e infecciones intestinales, respiratorias y del tracto urinario que los niños que mamaban.

La razón, según se sabe ahora, se encuentra en la leche de la madre, que contribuye a que el neonato se vea libre de enfermedades gracias a una serie de factores. La ayuda materna es especialmente eficaz en los primeros meses de vida, cuando el bebé no puede valerse aún, con plena eficacia, de su propio sistema inmunitario y defenderse de los microorganismos patógenos. La UNICEF y la Organización Mundial de la Salud recomiendan la lactancia natural “hasta los dos años o más incluso”. Sépase, por lo demás, que la plenitud inmunitaria del pequeño no se alcanza hasta los cinco años de edad, más o menos.

Todos los niños reciben ya cierta protección antes de nacer. A lo largo de la gestación, la madre envía anticuerpos al feto a través de la placenta. Estas proteínas circulan por la sangre del niño durante semanas, e incluso meses, después del nacimiento, neutralizando microorganismos o marcándolos para que los destruyan los fagocitos, células inmunitarias que engullen y degradan bacterias, virus y detritus celulares. Pero el niño amamantado goza de una protección añadida al recibir con la leche materna anticuerpos, otras proteínas y células inmunitarias.

Una vez ingeridas, estas moléculas y células contribuyen a la defensa contra microorganismos evitando que

JACK NEWMAN fundó en 1984 una clínica especializada en lactancia materna adscrita al Hospital Infantil de Toronto, de la que es director, tarea que comparte con la docencia universitaria. En su calidad de consultor de la UNICEF ha trabajado en el continente africano. También ha ejercido la medicina en Nueva Zelanda, en América del Sur y América Central.

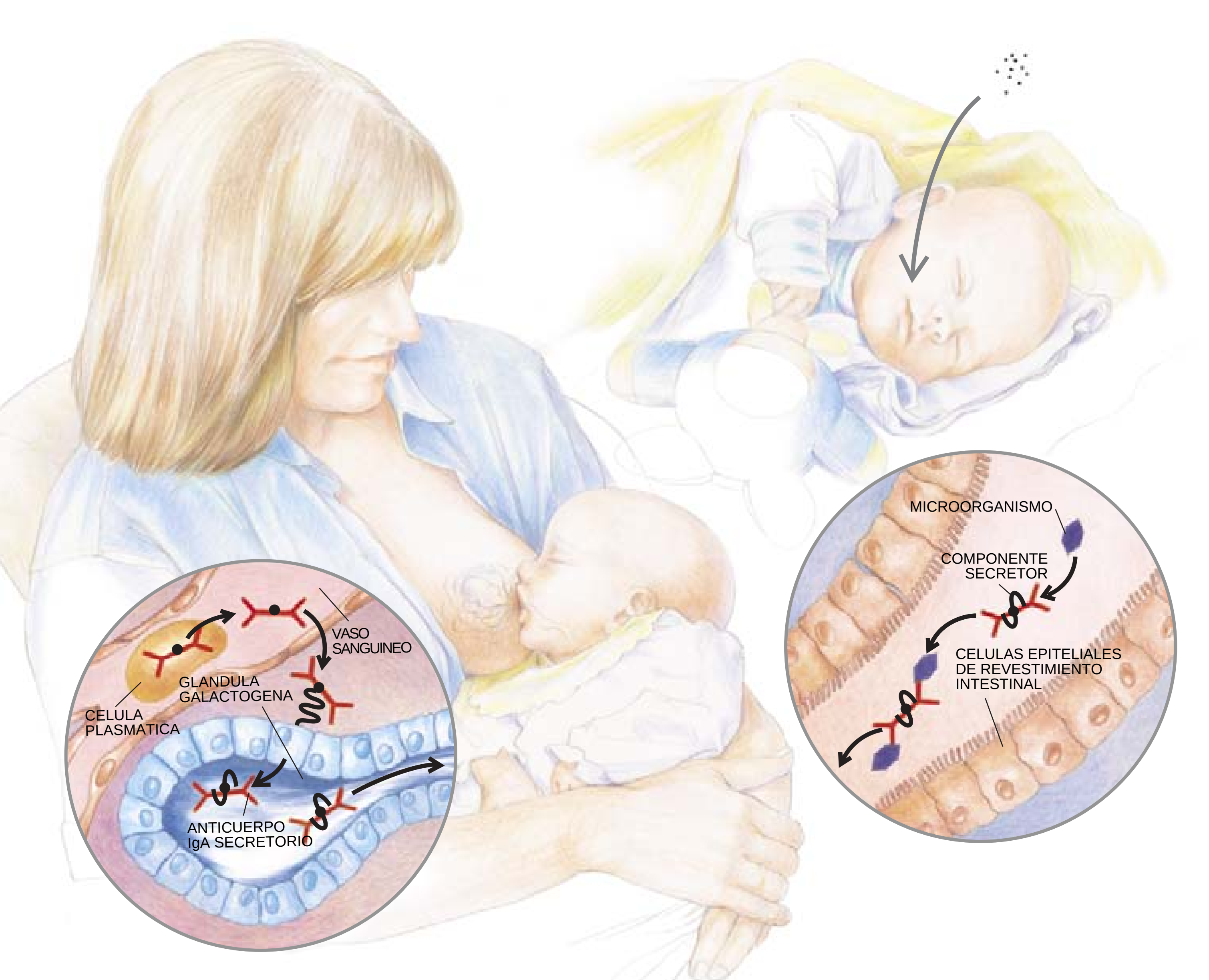


1. DESPUES DE INGERIR UN MICROORGANISMO *(izquierda)*, la parturienta fabrica moléculas de IgA secretoria, anticuerpo que pasa a la leche (*centro*) y contribuye a proteger al recién nacido frente a los agentes patógenos del entorno (*derecha*). Más específicamente, las células *M* de la madre (*círculo de la izquierda*) —del revestimiento del tracto digestivo— atrapan el microorganismo, que entregan a los

penetren en los tejidos del lactante. Algunas de las moléculas se engarzan en los microorganismos de la luz del tracto gastrointestinal. Consiguen así bloquearlos e impiden que se fijen a la mucosa intestinal y la atraviesen; se llama mucosa, o epitelio, la capa de células que tapiza el tracto digestivo y otras cavidades corporales. Compete a otras moléculas recortar el suministro de minerales y vitaminas que las bacterias patógenas necesitan para prosperar en el tracto digestivo. Ciertas células inmunitarias de la leche humana son fagocitos que atacan directamente a los microorganismos. Otra familia de esas células sintetizan moléculas que refuerzan la propia respuesta inmunitaria del lactante.

Los anticuerpos, denominados también inmunoglobulinas, se presentan en cinco formas básicas: IgG, IgA, IgM, IgD e IgE. Las cinco se encuentran en la leche humana. Predomina, con mucho, el tipo IgA, en particular el que se conoce con el nombre de forma secretoria de IgA, distribuida en grandes cantidades por el intestino y el sistema respiratorio de los adultos. Estos anticuerpos están constituidos por dos moléculas de IgA unidas a un componente secretor, una suerte de escudo de las moléculas del anticuerpo que las protege del ataque del jugo gástrico y de las enzimas digestivas del estómago e intestino. El niño que depende de la lactancia artificial dispone de medios muy limitados para hacer frente a los patógenos que ingiera mientras no empiece a fabricar sus propios complejos de IgA secretoria, algo que no sucede hasta transcurridas varias semanas, meses quizá, desde el nacimiento.

Las moléculas secretorias de IgA, que el lactante recibe de la madre, no limitan su virtualidad a la capacidad de unirse a microorganismos y mantenerlos alejados de los te-



macrófagos. Son éstos células inmunitarias que degradan el agente patógeno y presentan los fragmentos del mismo (antígenos) a otras células inmunitarias, los linfocitos *T* coadyuvantes; a su vez, éstos segregan sustancias que activan a otras células inmunitarias, los linfocitos *B*. Por su lado, las células *B* entran en una etapa de maduración y se transforman en células plasmáticas que se desplazan hasta los tejidos epiteliales de la mama y liberan anticuerpos (*círculo del centro*). Algunas de estas moléculas penetran en la leche que succiona el niño. En el tracto digestivo del bebé (*círculo de la derecha*), los anticuerpos, que están protegidos de la degradación por el componente secretorio, evitan que los microorganismos atraviesen las paredes intestinales del lactante.

Cuadro sinóptico de las ventajas inmunitarias de la leche materna

Componente	Acción
Leucocitos	
Linfocitos *B*	Generan anticuerpos dirigidos contra microorganismos específicos.
Macrófagos	Destruyen microorganismos en el intestino del lactante, producen lisozima y activan otros componentes del sistema inmunitario.
Neutrófilos	Pueden actuar a la manera de los fagocitos, ingiriendo bacterias del sistema digestivo del lactante.
Linfocitos *T*	Destruyen directamente células infectadas o envían mensajes químicos que ponen en marcha otras defensas. Proliferan en presencia de organismos que producen enfermedades graves en el recién nacido. También fabrican compuestos que refuerzan la propia respuesta inmunitaria del niño.
Moléculas	
Anticuerpos de la clase IgA secretoria	Se unen a microorganismos del tubo digestivo del niño y, por tanto, impiden su paso a través de las paredes del intestino, razón por la cual no llegan a los tejidos del organismo.
Proteína fijadora de B_{12}	Reduce la cantidad de vitamina B_{12}, que las bacterias necesitan para su crecimiento.
Factor bífido	Promueve el crecimiento de *Lactobacillus bifidus*, una bacteria inocua, en el intestino del niño. El crecimiento de estas bacterias inocuas contribuye a frenar el de las variedades dañinas.
Acidos grasos	Desgarran las membranas que rodean a algunos virus y los destruyen.
Fibronectina	Potencia la actividad antimicrobiana de los macrófagos; contribuye a la reparación de los tejidos lesionados por las reacciones inmunitarias en el intestino del niño.
Interferón gamma	Potencia la actividad antimicrobiana de las células inmunitarias.
Hormonas y factores de crecimiento	Estimulan el sistema digestivo del niño y hacen que madure más rápidamente. Una vez que se asegura el cierre del revestimiento membranoso que cubre el intestino maduro, el recién nacido se hace menos vulnerable a los microorganismos.
Lactoferrina	Se une a hierro, mineral que muchas bacterias necesitan para sobrevivir. Al mermar la cantidad disponible de hierro, la lactoferrina frena el crecimiento de las bacterias patógenas.
Lisozima	Destruye bacterias al disgregar sus paredes celulares.
Mucinas	Se adhieren a bacterias y virus, evitando así que los microorganismos se aferren a la superficie de las mucosas.
Oligosacáridos	Se unen a los microorganismos y les impiden que se adhieran a la superficie de las mucosas.

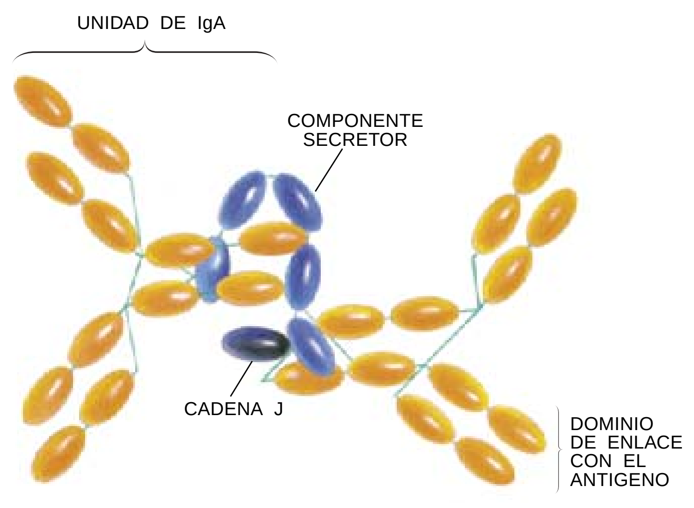
jidos corporales. En primer lugar, los anticuerpos transmitidos al recién nacido están muy polarizados contra los agentes patógenos presentes en el entorno inmediato. La madre sintetiza anticuerpos cuando ingiere un agente patógeno, lo inhala o entra en contacto con el mismo. Cada anticuerpo que fabrica es específico para cada uno de estos agentes; es decir, se tiene afinidad por una proteína, o antígeno, perteneciente al microorganismo y no perderá el tiempo atacando sustancias irrelevantes. Puesto que la madre sólo produce anticuerpos dirigidos contra los agentes patógenos presentes en el entorno, el niño recibe protección frente aquello que más necesita: contra los agentes infecciosos que con mayor probabilidad va a encontrarse en las primeras semanas de vida.

En segundo lugar, los anticuerpos que el recién nacido recibe no se inmutan ante la presencia de las bacterias útiles que suele haber en el intestino. Esta flora se encarga de arrinconar a los organismos nocivos que ven así dificultado su crecimiento, fenómeno que constituye un nuevo medio de resistencia. Pero se desconoce cómo se entera el sistema inmunitario materno de que debe fabricar anticuerpos exclusivamente dirigidos contra las bacterias patógenas y no contra las beneficiosas. Pero cualquiera que sea el mecanismo, facilita el asentamiento de las "bacterias buenas" en el intestino del lactante.

Las moléculas secretorias de IgA proporcionan al niño una nueva barrera defensiva que, a diferencia de lo que ocurre con los demás anticuerpos, mantiene a raya las enfermedades sin producir inflamación —un proceso en el que sustancias diversas destruyen los microorganismos, aunque podrían dañar los tejidos. Mientras se desarrolla el intestino del neonato, la membrana de mucosa resulta ser extremadamente delicada, por lo que un exceso de tales sustancias causaría un daño considerable.

Interesa resaltar la posibilidad de que la IgA secretoria proteja también la superficie de otras mucosas además de la intestinal. En muchos países, sobre todo del Medio Oriente, de la zona occidental de Sudamérica y del norte de Africa, las mujeres aplican leche a los ojos del niño para tratar infecciones de la conjuntiva. No tengo noticia de que se haya estudiado científicamente este remedio, pero en teoría podría resultar eficaz. Si no lo fuera al menos en algunas ocasiones, tal práctica hubiera desaparecido.

Son varias las moléculas de la leche de la madre, además de la IgA secretoria, que impiden que los microorganismos se adhieran a la superficie de las mucosas. Los oligosacáridos, simples cadenas de azúcares, contienen a menudo dominios que remedan los sitios de unión a través de los cuales las bacterias acceden al interior de las células que revisten el tracto intestinal. Así, estos azúcares pueden interceptar bacterias y formar complejos inocuos que el niño excreta. Además, la leche materna contiene mucinas, macromoléculas cuya estructura consta en buena parte de proteínas y carbohidratos. También las mucinas pueden adherirse a bacterias y virus, y eliminarlos del organismo.



2. UN ANTICUERPO SECRETORIO IgA, representado esquemáticamente, está constituido por dos moléculas de IgA "pegadas" entre sí por un fragmento proteico, la cadena J. El elemento secretor (*azul*) se enrolla alrededor de las moléculas unidas. Las elipses representan dominios funcionales. El anticuerpo consta de cuatro brazos, cada uno de los cuales contiene un dominio por donde se enlaza con el antígeno.

Además, las moléculas de la leche llevan a cabo otras funciones. Cada molécula de lactoferrina, por ejemplo, puede unirse a dos átomos de hierro. Como muchas bacterias patógenas prosperan en presencia de hierro, esta proteína detiene su propagación al privarles del ion. Se muestra sumamente eficaz a la hora de frenar la proliferación de microorganismos que, como *Staphylococcus aureus*, suelen producir graves infecciones en los niños. La lactoferrina corta también el proceso por el que las bacterias digieren carbohidratos, un motivo más para abortar su crecimiento. De manera semejante, la proteína fijadora de B_{12}, como su denominación sugiere, priva a los microorganismos de la vitamina B_{12}.

El factor bífido, uno de los primeros factores de la leche humana en conocerse de cuantos confieren resistencia a las enfermedades, promueve el crecimiento de *Lactobacillus bifidus*, un organismo beneficioso. Los ácidos grasos libres presentes en la leche pueden alterar las membranas de virus encapsulados, como el de la viruela de los pollos, que son paquetes de material genético recubierto por una envoltura proteica. El interferón, que se encuentra especialmente en el calostro —un tipo de leche de aspecto a veces amarillento, que produce en exigua cuantía la madre durante los primeros días después del alumbramiento— tiene también una potente actividad antivírica. Y la fibronectina, que abunda en el calostro, puede reforzar la agresividad de ciertos fagocitos, que así llegan a ingerir los cuerpos extraños aun cuando no estén marcados con el pertinente anticuerpo para su destrucción. Lo mismo que la IgA secretoria, la fibronectina frena el proceso inflamatorio; según parece, interviene también en la reparación del tejido alterado por la inflamación.

Al igual que ocurre con las moléculas defensivas, en la leche materna abundan las células inmunitarias. Son leucocitos, que combaten directamente la infección y activan otros mecanismos de defensa. En el calostro, tales células de la serie blanca se hallan en número elevadísimo. Se trata, en su mayoría, de neutrófilos, un tipo de fagocitos habituales en el torrente circulatorio. Hay datos que permiten sospechar que los neutrófilos mantienen su actividad fagocítica en el intestino del lactante. Sin embargo, éstos son menos agresivos que los neutrófilos de la sangre y acaban desapareciendo de la leche materna unas seis semanas después del parto. No se excluye, por tanto, que realicen alguna otra función, como podría ser la de proteger de las infecciones a la mama.

Siguen en abundancia a los neutrófilos los macrófagos, que son también fagocíticos y cumplen asimismo diversas misiones protectoras. Los macrófagos constituyen hasta un 40 por ciento del total de los leucocitos presentes en el calostro. Mucho más activos que los neutrófilos de la leche, podrían, a tenor de experimentos recientes, desarrollar una movilidad muy superior a la de sus congéneres de la sangre. Además de su carácter fagocítico, los macrófagos de la leche fabrican lisozima, contribuyendo a aumentar la cantidad de esta enzima en el tracto intestinal del niño. La lisozima destruye bacterias al desgarrar sus paredes celulares.

Más aún, los macrófagos, una vez en el intestino, pueden lanzar a los linfocitos contra microorganismos invasores. Los linfocitos representan el 10 por ciento restante de los leucocitos de la leche. Alrededor del 20 por ciento de estas células son linfocitos *B*, los productores de los anticuerpos; el resto son linfocitos *T*, que destruyen directamente células infectadas, o envían mensajes químicos para que intervengan otros componentes del sistema inmunitario. Según parece, el comportamiento de los linfocitos de la leche difiere del mostrado por los linfocitos de la sangre; aquéllos, por ejemplo, proliferan en presencia de *Escherichia coli*, una bacteria que puede poner en peligro la vida del lactante, pero ante otros agentes que representan una amenaza menor para el niño responden con mucha menos energía que los linfocitos de la sangre. Los linfocitos de la leche fabrican también diversas moléculas —interferón gamma, factor de inhibición de la migración y factor quimiotáctico del monocito, entre otras— que refuerzan la respuesta inmunitaria del propio lactante.

Varios estudios han llegado a la conclusión de que algunos factores de la leche materna podrían contribuir a la maduración del sistema inmunitario, que procede con mayor celeridad en el niño amamantado. Por ejemplo, los niveles de anticuerpos producidos en respuesta a inmunizaciones son más altos en el niño que recibe lactancia natural. Igualmente, ciertas hormonas de la leche (como el cortisol) y proteínas presentes en cantidades pequeñas (factor de crecimiento epidérmico, factor de crecimiento nervioso, factor de crecimiento parainsulínico y somatomedina C) contribuyen a sellar el revestimiento mucoso del recién nacido, haciéndolo bastante impermeable a los agentes patógenos indeseables y otros potencialmente nocivos. En estudios con animales se ha observado que el desarrollo

del intestino después del nacimiento se produce con mayor rapidez en los individuos amamantados. Y los animales que reciben el calostro, que contiene las mayores concentraciones de factor de crecimiento epidérmico, maduran antes incluso.

Otros compuestos desconocidos que se esconden en la leche materna estimulan sin duda la producción infantil de IgA, lactoferrina y lisozima. Estas tres moléculas se encuentran en mayores cantidades en la orina de los niños que reciben lactancia natural que en la de los que reciben lactancia artificial. Al ser el niño incapaz de absorber estas moléculas por el intestino, debe suponerse que el lactante las produce en la mucosa del tracto urinario. En otras palabras, todo indica que la lactancia natural induce inmunidad local en el tracto urinario.

Respaldan esa hipótesis ciertos estudios clínicos, que han demostrado que los niños amamantados corren menos riesgo de padecer infecciones del tracto urinario. Por último, existen datos que sugieren la existencia de un factor, por el momento desconocido, presente en la leche humana, que podría inducir la producción de fibronectina por parte de los niños que se alimentan con lactancia natural, y fabricarla en una cuantía mucho mayor que la realizada por los que se alimentan con lactancia artificial.

Todo este conjunto de cosas hacen de la leche un líquido realmente fascinante, que aporta al pequeño mucho más que una buena nutrición. Le protege frente a infecciones hasta que llega el momento en que puede valerse por sí mismo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMMUNOLOGY OF MILK AND THE NEONATE. Dirigido por J. Mestecky y cols. Plenum Press, 1991.

BREASTFEEDING AND HEALTH IN THE 1980'S: A GLOBAL EPIDEMIOLOGIC REVIEW. A. S. Cunningham en *Journal of Pediatrics*, vol. 118, n.º 5, págs. 659-666; mayo de 1991.

THE IMMUNE SYSTEM OF HUMAN MILK: ANTIMICROBIAL, ANTIINFLAMMATORY AND IMMUNOMODULATING PROPERTIES. A. S. Goldman en *Pediatric Infectious Disease Journal*, vol. 12, n.º 8, págs. 664-671; agosto de 1993.

HOST-RESISTANCE FACTORS AND IMMUNOLOGIC SIGNIFICANCE OF HUMAN MILK. En *Breastfeeding; A Guide for the Medical Profession*, por R. A. Lawrence. Mosby Year Book, 1994.

Comunicación confidencial en Internet

La criptografía permite certificar la identidad de nuestros corresponsales, primer paso para establecer la mutua confianza

Thomas Beth

"Guardaos del lobo", prevínoles mamá cabra. "Si consigue entrar, os devorará; no dejará de vosotros ni los huesos ni la piel. El malvado suele disfrazarse, pero siempre podréis descubrirlo por su voz ronca y por sus patas negras."

—de *El lobo y los siete cabritillos*, de los hermanos Grimm.

La bienintencionada mamá cabra trataba de proteger a sus hijitos mediante lo que en la jerga de seguridad informática se denominaría "un control de acceso": no hay que dejar pasar a nadie que no tenga la voz clara y enseñe patita blanca. En teoría, este método es muy eficaz, porque verifica las características físicas de quienes están autorizados a entrar. En el cuento, el fallo fatal estribó en la exigüidad de la información requerida. Es fácil distinguir a una cabra de un lobo si se puede ver el cuerpo entero, pero los cabritillos solamente habían sido aleccionados sobre el color de la pata y el timbre de voz.

Tanto es el dinero, y tan valiosa la información que los ordenadores transfieren, que las comunicaciones entre ellos constituyen un objetivo tentador para los delincuentes. No obstante, quienes tratan de proteger sus datos y sus transmisiones son menos cautelosos que las cabras: intentan distinguir amigos de enemigos mediante una mera secuencia de símbolos enviados a través de una red por un corresponsal.

El relativo anonimato que las redes ofrecen en la actualidad, sumado a la potencia cada vez mayor de las máquinas a ellas conectadas, está infundiendo temores en los gobiernos, que ya prevén una creciente oleada de delincuencia informática. Muchos países están respondiendo con medidas draconianas, que tal vez resulten, cuando menos, tan perniciosas como los males que pretenden atajar. El autor y sus colegas están convencidos, empero, de haber hallado un desfiladero entre los peligros del control estatal de las claves de comunicación y el campo abierto a la delincuencia organizada. Sólo tuvimos que esforzarnos un poco más para encontrarlo.

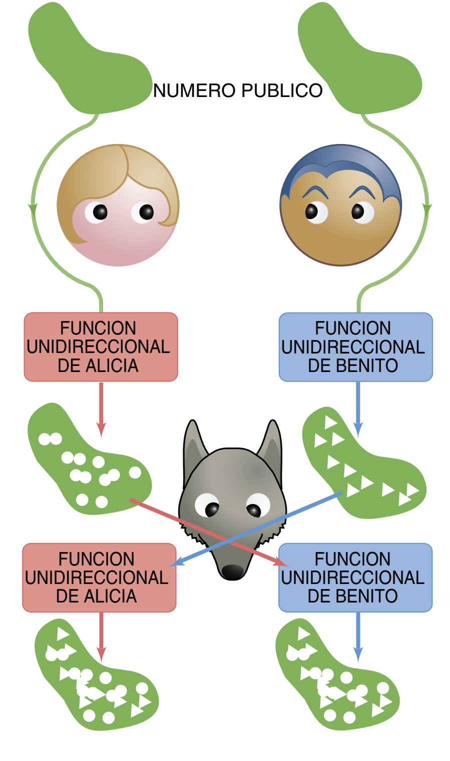
Quien se comunique a través de un ordenador necesita un sistema de seguridad que garantice tres requisitos esenciales: confidencialidad, autentificación y confianza mutua. Incluso la rutina, en apariencia simple, de retirar dinero de un cajero automático de un banco requiere una comunicación basada en tal confianza. En la actualidad, este sistema funciona de modo estrictamente unilateral: la máquina se cerciora de que la persona que ha insertado la tarjeta es el legítimo titular solicitándole una contraseña secreta; por su parte, el poseedor de la tarjeta tiene que confiar ciegamente en que la máquina no ha sufrido manipulación alguna.

1. LA CADENA DE CERTIFICACIONES del sistema propuesto por el autor se extiende desde autoridades locales, que avalan la identidad y probidad de un individuo, hasta autoridades regionales, nacionales o supranacionales (*representadas aquí por diferentes nombres y sellos*), cada una de las cuales es garante de las situadas por debajo. Para impedir la falsificación se emplean firmas digitales; quien reconozca alguna de las firmas de la cadena puede estar seguro de que el documento firmado es válido.

Las funciones unidireccionales frustran a los fisgones

Una técnica conocida por intercambio de claves Diffie-Hellman permite que dos corresponsales se comuniquen de forma segura a través de un canal vulnerable. El intercambio se basa en un tipo de función unidireccional denominada exponenciación modular. (La función unidireccional es una transformación numérica que resulta fácil de realizar pero imposible de deshacer.) Para codificar un mensaje se eleva a potencia una constante (3, por ejemplo) usando como exponente el número que representa el mensaje en forma digital; se toma después el resto de la división de tal número entre un número primo grande. Por ejemplo, para codificar el número 66 se podría calcular el resto de la división de 3^{66} entre, sea por caso, 127. (En una situación real, el número primo sería muchísimo mayor, tal vez de unos 300 dígitos.)

Benito y Alicia aplican sucesivamente sus exponenciaciones a una ristra de bits conocida (*arriba*); en un caso Alicia es la primera en aplicar su operación; en otro, el primero es Benito. El orden no influye en el resultado final, pero la potenciación entremezcla los bits de tal forma que ningún fisgón conseguiría determinar ni los exponentes que Alicia y Benito están aplicando, ni la ristra final que ambos comparten, la cual puede servir entonces como clave de codificación para transacciones futuras. —*T.B.*



Aunque este modelo garantizador clásico pueda haber sido adecuado antaño, hoy resulta ingenuo suponer que no se ha manipulado ninguna de las máquinas que intervienen en una comunicación.

En la medida en que ambos interlocutores de una comunicación estén supervisados por una institución común, para proporcionar autentificación y confidencialidad podría utilizarse un equivalente electrónico de una oficina central de expedición de certificados. Tal es el principio que subyace al protocolo Cerbero del sistema Atenea del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Sería absurdo, sin embargo, utilizar el mismo método para los millones de usuarios de Internet. En primer lugar, la construcción y gestión continua de tan enorme servidor de archivos resulta inviable. Por otra parte, tan gran concentración de datos delicados sería un incentivo para ataques delictivos, por difíciles que fueran.

Además, en redes abiertas, la verificación por medio de contraseñas secretas de la identidad de la persona que ocupa un terminal no ofrece seguridad. Hay programas, conocidos por "olisqueadores de paquetes", que van registrando subrepticiamente las combinaciones de contraseñas y de nombres de usuario. Tales programas se han visto implicados en docenas de graves fallos de seguridad en los Estados Unidos y en Europa. Al usuario de Internet no se le debería solicitar que teclease una contraseña o que revelase características personales que otros pudieran copiar; antes bien, debería pedírsele ciertas respuestas basadas en su conocimiento de algún secreto, sin revelarlo.

En 1986, el autor y sus colegas del instituto de informática de la Universidad de Karlsruhe comenzaron a ocuparse de este problema. Aunque nos fue cercenada la financiación para nuestro proyecto inicial, hemos logrado poner a punto un sistema de seguridad para redes. Lo hemos llamado SELANE (acrónimo de área local segura). El nombre alude también a la deidad griega Selene, la Luna, que se mueve por el firmamento abierto con igual rango que sus hermanos, Eos y Helios, de la misma manera que los participantes en una transacción electrónica han de ser iguales.

SELANE es compatible con casi todas las redes comerciales y académicas. Hemos creado también una tarjeta electrónica "inteligente", capacitada para efectuar de forma segura los cálculos necesarios para cada usuario. SELANE se utiliza ya en nuestra universidad, donde proporciona seguridad de acceso a la red departamental.

La criptología moderna se basa en la noción de que todos los textos digitales son cadenas de dígitos binarios (bits), que cabe interpretar como números. La encriptación consiste, pues, en aplicar una función matemática apropiada, con el propósito de convertir una ristra inteligible de números en un pseudogalimatías, legible únicamente por quien conozca la función y la clave apropiada.

El primer problema que plantea la seguridad de las redes es la confidencialidad de las comunicaciones. ¿De qué forma podrán Alicia y Benito (nombres que los criptógrafos gustan dar a los participantes en una comunicación) intercambiar de forma segura una secuencia de bits de carácter confidencial por una línea que pudiera estar "pinchada"? Como mínimo, han de poder intercambiarse una clave utilizable para la encriptación y descifrado de mensajes posteriores. En los años setenta, Martin E. Hellman, Whitfield Diffie y Ralph Merkle, de la Universidad de Stanford, desarrollaron un método que facultaba a Alicia y a Benito para obtener la misma ristra de dígitos binarios sin enviar por la línea ni los bits ni la información necesaria para su reconstrucción.

Hellman, Diffie y Merkle se valieron de las funciones de dirección única (funciones trampilla), cuyos

THOMAS BETH es director del Instituto Europeo de Sistemas de Seguridad, que contribuyó a fundar en 1988. Es también profesor de informática en la Universidad de Karlsruhe, en la que viene trabajando desde 1985. Inició la carrera de exactas en la Universidad de Göttingen y se doctoró por la de Erlangen.

valores son fáciles de calcular, pero cuya función inversa es prácticamente imposible de hallar. El conocimiento del resultado de aplicar una función unidireccional a un número no aporta indicio alguno de cuál pudo ser tal número. La clase de funciones unidireccionales empleada por nosotros se basa en una técnica de exponenciación modular. La exponenciación modular preserva entre los números codificados dos importantes relaciones. En primer lugar, es conmutativa, lo que significa que pueden efectuarse múltiples operaciones de potenciación sobre una ristra de datos sin que el resultado dependa del orden en que se realicen. En segundo lugar, la exponenciación modular es homomórfica; vale decir: si un número es suma de otros dos, el producto de las exponenciales modulares de éstos dará la exponencial de aquél.

Para intercambiar una clave con Benito de acuerdo con el protocolo Diffie-Hellman, Alicia toma un número públicamente conocido, le aplica una función unidireccional propia —una exponenciación cuya potencia, secreta, solamente ella conoce— y le envía a Benito el resultado a través de canales de uso público. Dado que la exponenciación es una función unidireccional, un fisgón no puede extraer el secreto de Alicia a partir de la combinación de la secuencia pública de bits y de su versión exponenciada. Benito, entretanto, aplica su exponente secreto al mismo número públicamente conocido, y le envía el resultado a Alicia.

Alicia y Benito aplican entonces sus funciones unidireccionales al número que han recibido del otro. Dado que la composición de ambas produce el mismo resultado independientemente de cuál se haya aplicado en primer lugar, ambos socios acabarán con la misma secuencia de bits, que nadie más conoce. Pueden entonces utilizar esa secuencia como "clave" para una función que codifique y descodifique la información que deseen intercambiar. Una tercera persona que haya supervisado los intercambios será incapaz de determinar la clave o las funciones secretas de Alicia y Benito.

El segundo problema es la autentificación: Benito ha de poder cerciorarse de que ha sido realmente Alicia quien le ha enviado un mensaje. No existe, empero, un fedatario central que pueda certificar la identidad de cada usuario particular de Internet. Mientras reflexionábamos sobre este problema, nos acordamos de un sistema de control de acceso que se emplea con éxito a diario en todo el mundo: los pasaportes. La fotografía del pasaporte más la firma del titular establecen una conexión con éste que es ulteriormente verificada por el emblema del país correspondiente y por el sello y firma de la oficina expedidora. La característica más importante del pasaporte es que cualquiera puede verificar su validez sin consultar a la autoridad emisora.

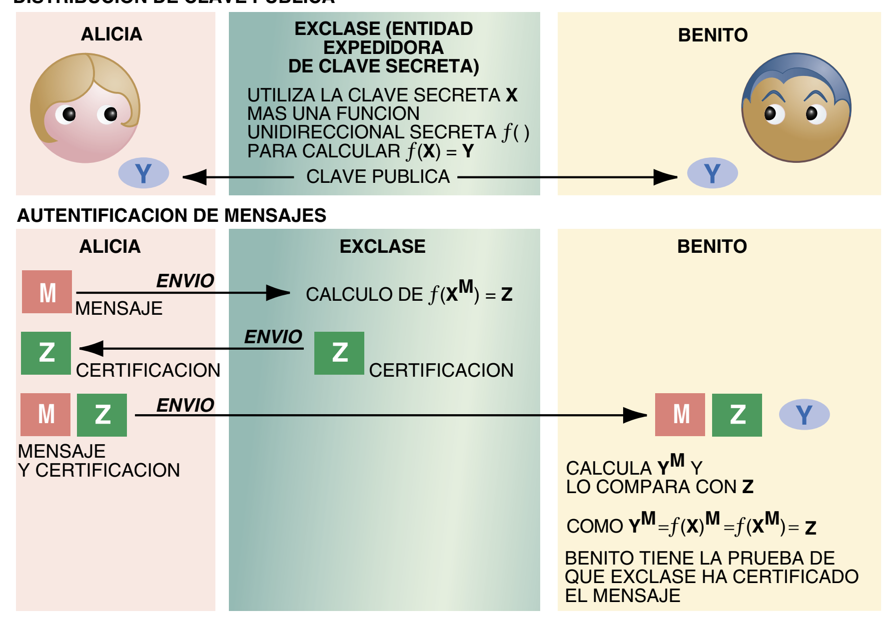
En 1984, Taher ElGamal, a la sazón en la Universidad de Stanford, ideó un sistema de firma digital que podía utilizarse para certificar tanto la identidad del remitente de un mensaje como la integridad de su contenido. Quienquiera que desee firmar documentos selecciona como firma particular una ristra de bits, secreta y permanente, y publica una versión de tales bits, distorsionada mediante exponenciación, que tendrá el carácter de firma pública. Para firmar un documento concreto se procede como sigue:

- Se genera un vale de un solo uso (un equivalente digital de un número de serie).
- Se le aplica al vale una función exponencial de dirección única, obteniéndose una versión distorsionada.
- Se plantea y resuelve una ecuación que relacione los valores numéricos del mensaje que se está enviando, la ristra de bits personal y secreta, el vale y la versión distorsionada del vale.
- Se transmite el mensaje.
- Se añade una firma formada por el vale distorsionado y la solución de la ecuación.

Quienes conozcan la firma pública del signatario (la versión distorsionada exponencialmente de la ristra de bits secreta) puede verificar que los números de la firma se generaron a partir de la ristra particular y del mensaje en cuestión. Han sido muchas las variantes del esquema básico de



2. RELOJ CRIPTOGRAFICO desarrollado por Skidata Computer en Austria. Aloja un transmisor-receptor de corto alcance y un microordenador.



3. EL PROTOCOLO de autentificación se basa en una secuencia secreta de bits, que sólo conoce el organismo certificador, más una serie de operaciones de exponenciación. Aunque la entidad certificadora sólo ofrece una imagen distorsionada de su secreto, aún es posible comprobar que ha sido ella la firmante de un determinado documento.

¿Y si es necesario intervenir la línea?

Las técnicas criptográficas que el autor y sus colegas han venido desarrollando pueden ofrecer una solución al conflicto, cada vez más agudo, entre individuos que desean preservar el secreto de sus comunicaciones e instituciones encargadas del cumplimiento de las leyes, que quisieran poder descodificar pruebas de la comisión de delitos. Temeroso de que dentro de poco las escuchas sólo proporcionen puros galimatías, el gobierno estadounidense ha restringido la exportación de equipos criptográficos; está asimismo tratando de imponer la adopción de un sistema telefónico “seguro”, basado en un microcircuito codificador. Llamado Clipper, sus claves, conservadas a buen recaudo en instituciones oficiales, le serían comunicadas a las fuerzas de seguridad por orden judicial. Los detalles del sistema son secretos.

Poca confianza puede inspirar semejante plan. Ante todo, no está claro que las claves queden a resguardo, sobre todo en los casos en que deban intervenir instituciones de varios países. En segundo lugar, no hay forma de que las personas ajenas al sistema puedan estar seguras de que no existan métodos de descodificación que no pasen por la intervención judicial.

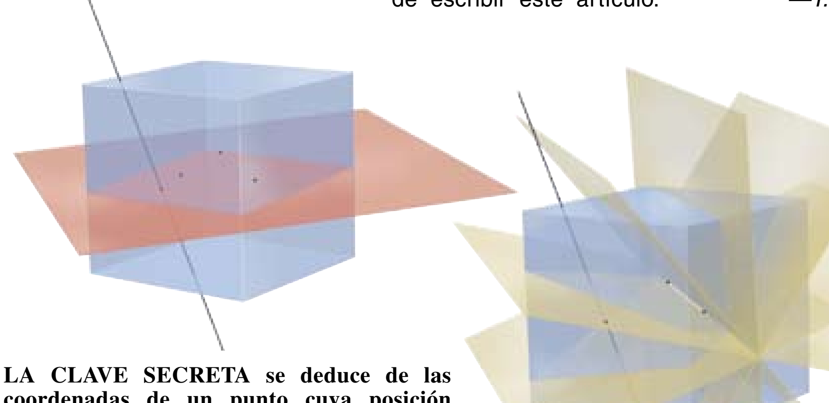
No ocurre eso con los métodos que hemos desarrollado para SELANE. Pueden servir de base para un sistema criptográfico equitativo, que situaría en un mismo plano a usuarios y a escuchas de la autoridad. Proporciona un instrumento verificable de intercambio y autentificación de claves, apto para funcionar con el Clipper o con dispositivos de codificación más seguros todavía. Para reforzar en los usuarios la confianza en el sistema, podrían construirse claves digitales cuya intervención exigiría la cooperación de varias instituciones.

Para entender cómo podrían lograrse garantías de esta naturaleza conviene imaginar que la secuencia de bits que compone la clave no representa un número, sino tres o más. En ese contexto, a Gustavus J. Simmons, de los Laboratorios Nacionales Sandia, se le ocurrió la idea de utilizar tres partes de una clave secreta con carácter de coordenadas enteras de un punto del espacio tridimensional.

Se podría convenir en que la totalidad de las secuencias numéricas secretas utilizables hubieran de corresponder a puntos ubicados sobre una recta preconvenida, universalmente aceptada. (Por ser tantísimos los puntos de una recta, incluso este conjunto “restringido” es lo bastante grande para ser seguro.) Para escindir la información relativa al punto secreto se selecciona un plano que pase por el punto secreto, y se toman en este plano tres puntos al azar, puntos que pueden emplearse para reconstruir el plano y calcular su intersección con la recta.

Cada uno de los miembros del comité recibe las coordenadas de dos de los puntos. En cuanto dos miembros estén de acuerdo, podrán determinar el punto secreto. Sin embargo, gracias a SELANE, pueden también cerciorarse de que les han sido proporcionadas coordenadas correctas sin hallar realmente el secreto (y al hacerlo, poner en peligro la clave asociada). Si proporcionan a sus colegas versiones de sus puntos distorsionadas por exponenciación, la relación matemática que se verifica entre aquellos puntos y una versión distorsionada de la recta se da también entre los puntos reales y la recta donde yace el punto secreto.

Este principio admite generalización a comités de tamaño cualquiera, con subconjuntos arbitrarios de miembros autorizados. Una responsabilidad compartida de esta clase complicaría cualquier tentativa de romper el secreto por la violencia, la extorsión o el cohecho. Estoy convencido de que el mundo empresarial daría la bienvenida a un tal sistema, sobre todo si la alternativa es de imposición gubernamental. Y también por parte de los gobiernos recibiría buena acogida, si la alternativa es la anárquica diseminación de potentes sistemas criptográficos que está produciéndose en el momento de escribir este artículo. *—T. B.*



LA CLAVE SECRETA se deduce de las coordenadas de un punto cuya posición es calculable a partir de las de otros tres puntos y del conocimiento de una recta en la que se encuentra el secreto.

LA INFORMACION concerniente a los tres puntos puede dividirse entre varios depositarios, sin que ninguno, por sí solo, pueda deducir el punto secreto. Ello se debe a que por los dos puntos que cada uno conoce pasa una infinidad de planos.

ElGamal que se han construido a lo largo de los diez últimos años.

Armados con este proceso de imposible falsificación, hemos ideado un sistema que establecería una entidad expedidora de claves seguras (EXCLASE), que haría las veces de una oficina de expedición de pasaportes para cada uno de los ordenadores de una red local. Antes de expedir el primer identificador, la EXCLASE adopta sus propias claves de firma, secreta una de ellas y distorsionada y pública la otra. El que desee comprobar los identificadores

expedidos por la EXCLASE ha de retener una copia de la clave pública, de igual forma que cada oficina de inmigración extranjera dispone de un ejemplar de muestra de un pasaporte estadounidense.

La EXCLASE proporciona un "testigo" (un microcircuito imposible de trucar, incluido en una tarjeta de crédito o en un reloj diseñado con ese fin) a cada una de las personas, terminales u ordenadores de su red. Este testigo puede utilizarse en todas las transacciones posteriores. Cuando Alicia le solicita a EXCLASE un identificador, EXCLASE le entrega un testigo cuya memoria contiene un mensaje legible —"La titular, Alicia Prodigio, es profesora de informática en la Universidad de Karlsruhe"— amén de una firma de tipo ElGamal basada en el mensaje.

Para convencer a Benito de que su identificador es válido, Alicia ha de ordenar a su tarjeta inteligente que le facilite a Benito el mensaje y el vale de uso único distorsionado derivado de su firma. Benito utiliza estos valores, juntamente con la clave pública de EXCLASE, para computar una imagen distorsionada del resto de la firma, que el testigo no revela. Para asegurarse de que el identificador es válido, Benito puede iniciar una secuencia de "preguntas difíciles" con el testigo, planteándole preguntas que éste sólo pueda contestar si en verdad contiene la parte secreta de la firma.

El autor y sus colegas Fritz Bauspiess, Christoph Günther y Hans-Joachim Knobloch han diseñado un protocolo que funde en un paso la autentificación y la identificación con el subsiguiente intercambio de claves. Este protocolo puede ejecutarlo una tarjeta inteligente en una fracción de segundo. Si sus identificadores son correctos, los dos interlocutores acaban con una clave común, con la cual codificar comunicaciones posteriores. Empero, si la autentificación falla, cada uno recibe una secuencia de bits diferente e inútil.

En principio, este método de autentificación se basa en el conocimiento que Benito tiene de la EXCLASE a la que Alicia pertenece, y en la confianza que tal EXCLASE le merece. Por ejemplo, quienes quisieran verificar los identificadores digitales del personal docente o administrativo de una universidad alemana tendrían que conocer la firma de la EXCLASE de cada centro de cálculo de cada una de las universidades.

Sin embargo, para el tráfico internacional de datos, este método no resulta práctico. Por tanto, las EXCLASE han de legitimarse a sí mismas procurándose una identificación certificada por una EXCLASE de mayor rango. Se podría establecer una estación central distribuidora de identificadores que sirviera a todas las universidades alemanas, encargándose de certificar la solvencia de la EXCLASE de cada universidad, la cual, a su vez, certificaría las EXCLASE internas. Este sistema puede generalizarse a un número cualquiera de niveles. Por ejemplo, una estación central alemana podría certificarse a sí misma valiéndose del identificador digital de una central europea de distribución de identificadores, la cual, a su vez, estaría legitimada por una organización de amplitud mundial. Para verificar un identificador, sólo sería necesario saber las firmas digitales de unas pocas autoridades certificadoras de máximo nivel, y confiar en ellas.

Esta misma estructura jerárquica podría servir también para los empleados de sociedades anónimas y para los afiliados de otras organizaciones. En un futuro que confiamos llevar a la práctica, los principios de SELANE permitirían efectuar transacciones comerciales a través de una red con tanta confianza como si se estuviera tratando cara a cara.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PUBLIC KEY CRYPTOSYSTEM AND A SIGNATURE SCHEME BASED ON DISCRETE LOGARITHMS. Taher ElGamal en *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 31, n.º 4, páginas 469-472; julio de 1985.

EFFICIENT ZERO-KNOWLEDGE IDENTIFICATION SCHEME FOR SMART CARDS. T. Beth en *Advances in Cryptology*: *EUROCRYPT'88*. Dirigido por Christoph Günther. Springer-Verlag, 1988.

CONTEMPORARY CRYPTOLOGY: THE SCIENCE OF INFORMATION INTEGRITY. Gustavus J. Simmons. IEEE Press, 1992.

PUBLIC-KEY CRYPTOGRAPHY: STATE OF THE ART AND FUTURE DIRECTIONS. Dirigido por T. Beth, M. Frisch y G. J. Simmons. Springer-Verlag, 1992.

KEEPING SECRETS A PERSONAL MATTER OR THE EXPONENTIAL SECURITY SYSTEM. T. Beth en *Cryptography and Coding III*. Dirigido por M. J. Gantley. Oxford University Press, 1993.

RFC 1824: THE EXPONENTIAL SECURITY SYSTEM TESS. H. Danisch en European Institute for System Security. Ubicado en World Wide Web en http://avalon.ira.uka.de/eiss/indexe.html

El problema de la consciencia

Los expertos en neurología han decidido abordar uno de los misterios más profundos de la existencia. Pero el mero conocimiento del cerebro quizá no les lleve hasta el fondo del problema

David J. Chalmers

La consciencia nos es, a la vez, lo más familiar y lo más misterioso del mundo. Nada hay que conozcamos de forma más directa, pero resulta dificilísimo conciliarla con el resto de nuestros conocimientos. ¿Por qué existe? ¿Qué hace? ¿Cómo surge, posiblemente, de los procesos neuronales del cerebro? Cuestiones todas ellas que se numeran entre las más apasionantes de la ciencia.

Desde un punto de vista objetivo, podemos llegar a conocer bastante bien el cerebro. Cuando el lector se detiene en esta página, hay un revoloteo de procesos: los fotones inciden en su retina, las señales eléctricas remontan el nervio óptico y atraviesan áreas diferentes de su cerebro, para que, al final, responda con una sonrisa, una expresión de perplejidad o un comentario. Pero se da también un aspecto subjetivo. Cuando el lector mira la página es consciente de que lo hace; percibe imágenes y palabras como parte de su vida interior, privada, mental. Todos tenemos vivas impresiones de las flores con sus colores, del cielo estrellado. Puede que sintamos además algunas emociones y formemos determinados pensamientos. Juntas, estas experiencias constituyen la consciencia, la vida subjetiva, interior, de la mente.

Durante muchos años, quienes investigaban el cerebro y la mente eludieron la consciencia. Dominaba la idea de que la ciencia, que se apoya en la objetividad, no podía dar cabida a algo tan subjetivo como la consciencia. El movimiento behaviorista en psicología, imperante en la primera mitad del siglo, se concentró en el comportamiento externo y desdeñó todo lo que tuviese que ver con procesos mentales internos. Más tarde, el ascenso de la ciencia cognitiva centró la atención en los procesos que ocurrían dentro de la cabeza. Pero la consciencia siguió a extramuros, apta sólo para discutir de madrugada, con unas copas delante.

En los últimos años, sin embargo, un número creciente de neurólogos, psicólogos y filósofos ha rechazado que no se pueda estudiar la consciencia e intenta desentrañar sus secretos. Como cabría esperar de un campo novedoso, hay una maraña de teorías diversas, que polemizan unas con otras; a menudo usan los conceptos básicos de forma incompatible. Para desenredar la madeja, el razonamiento filosófico resulta imprescindible.

La miríada de concepciones que pululan en este campo van de las teorías reduccionistas, según las cuales la consciencia se puede explicar con los métodos habituales en neurología y psicología, a la postura de los llamados mistéricos, para quienes nunca comprenderemos la consciencia en absoluto. Creo que el análisis atento muestra que ambas ideas son erróneas y que la verdad cae en medio.

Contra el reduccionismo defenderé que las herramientas de la neurología no pueden proporcionar una explicación completa de la experiencia consciente, aunque tengan mucho que ofrecer. Contra el misterismo sostendré que un nuevo tipo de teoría podría explicar la consciencia. Aún se nos escapan los entresijos de esa teoría, pero el razonamiento riguroso y ciertas inferencias fundamentadas descubren algo de su naturaleza general. En ese orden, creo que la teoría en cuestión habrá de basarse en nuevas leyes fundamentales y puede que el concepto de información desempeñe un papel central. Estos tenues destellos sugieren que una teoría de la consciencia tendría quizá consecuencias sorprendentes en nuestra forma de ver el universo y a nosotros mismos.

Los investigadores usan la palabra “consciencia” de muchas formas



diferentes. Para aclarar la cuestión, tenemos que separar primero los problemas que con frecuencia se cobijan bajo ese nombre. A tal fin, importa distinguir entre los "problemas fáciles" y el "problema duro" de la consciencia. Los problemas fáciles no son en absoluto triviales —encierran la complejidad propia de los problemas de la psicología y la biología—, pero el misterio central radica en el problema duro.

Entre los problemas fáciles de la consciencia figuran los siguientes: ¿Cómo discierne el sujeto entre un estímulo sensorial y otro, y reacciona ante ellos según lo pertinente? ¿Cómo integra el cerebro la información que le llega de fuentes dispares y se sirve de ella para controlar el comportamiento? ¿Por qué pueden los individuos verbalizar sus estados internos? Aunque estas preguntas están asociadas a la consciencia, todas se refieren a los mecanismos objetivos del sistema cognoscitivo. En consecuencia, tenemos pleno derecho para esperar que la investigación incesante en los dominios de la psicología cognitiva y la neurología hallen la respuesta.

El problema duro, por el contrario, es el de cómo los procesos físicos del cerebro dan lugar a la consciencia. Se refiere al aspecto interior del pensamiento y la percepción, a la sensación que las cosas producen en el sujeto. Cuando vemos, por ejemplo, experimentamos sensaciones visuales, como la de un azul vivo. O piense en el inefable sonido de un oboe lejano, el sufrimiento de una gran pena, el



1. UNA NEUROLOGA AISLADA en una habitación blanca y negra lo sabe todo acerca de la manera en que el cerebro procesa los colores, pero no sabe en qué consiste verlos. Esta historia sugiere que el conocimiento del cerebro no ofrece un conocimiento completo de la experiencia consciente.

gozo de la felicidad o la cualidad meditativa de un momento en que nos perdemos en nuestros pensamientos. Todo ello es parte de lo que llamo consciencia. Estos fenómenos son los que plantean el verdadero misterio de la mente.

Para ilustrar la diferencia entre lo uno y lo otro, considere un experimento mental concebido por el filósofo australiano Frank Jackson. Suponga que María, neuróloga del siglo XXIII, es la más destacada experta del mundo en los procesos cerebrales a los que se debe la visión del color. Pero María ha pasado toda su vida en una habitación blanca y negra y no ha visto nunca ningún otro color. Sabe todo lo que hay que saber acerca de los procesos físicos del cerebro: su biología, su estructura y su función. Con ese conocimiento sabe todo lo que hay que saber sobre los problemas fáciles: cómo distingue el cerebro entre estímulos, integra la información y produce comunicaciones verbales. Por su conocimiento de la visión del color, sabe cuál es la correspondencia entre los nombres de los colores y las longitudes de onda del espectro de la luz. Pero aun así hay algo, crucial, acerca de la visión del color que a María se le escapa: cuál es la experiencia de un color, el rojo, por ejemplo. Esto quiere decir que se dan hechos relativos a la experiencia consciente que no se deducen de los hechos físicos concernientes al funcionamiento del cerebro.

En realidad, nadie tiene ni la menor idea de por qué la experiencia consciente acompaña a esos procesos físicos. ¿Por qué cuando nuestro cerebro procesa la luz de una cierta longitud de onda tenemos la experiencia del púrpura oscuro? ¿Por qué siquiera tenemos una experiencia? ¿No podría un autómata inconsciente haber efectuado las mismas tareas igual de bien? Estas son las preguntas que nos gustaría las contestara una teoría de la consciencia.

No niego que la consciencia surja del cerebro. Sabemos, por ejemplo, que la experiencia subjetiva de la visión está íntimamente ligada a los procesos de la corteza visual. Sin embargo, es el vínculo mismo lo que deja perplejo. No es cuestión menor que la experiencia subjetiva parezca salir de un proceso físico, pero no tenemos ni idea de cómo o por qué es así.

Dado el reciente aluvión de trabajos sobre la consciencia acometidos por neurólogos y psicólogos, pudiera pensarse que el misterio empieza a aclararse. Un examen más atento, por contra, nos revela que casi todas las investigaciones actuales se dirigen sólo a los problemas fáciles de la consciencia. La confianza en el punto de vista reduccionista viene del progreso en los problemas fáciles, que no sirve de nada por lo que se refiere al problema duro.

Piénsese en la hipótesis propuesta por los neurobiólogos Francis Crick, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, y Christof Koch, del Instituto de Tecnología de California. Sostienen que la consciencia podría surgir de ciertas oscilaciones de la corteza cerebral, que se sincronizan al dispararse las neuronas 40 veces por segundo. Crick y Koch creen que el fenómeno podría explicar de qué manera se funden en un todo coherente los distintos atributos de un solo objeto percibido (su color y su forma, por ejemplo) que se procesan en partes diferentes del cerebro. En esta teoría, dos elementos de información quedan unidos precisamente cuando los representan disparos neuronales sincronizados.

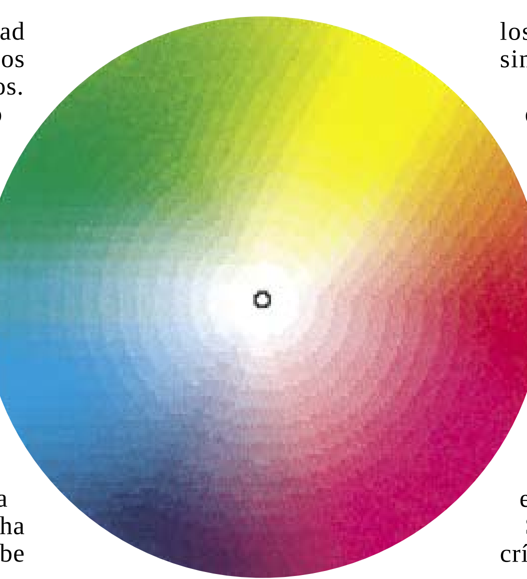
Cabe en principio que la hipótesis elucidara uno de los problemas fáciles, el de cómo el cerebro integra la información. Pero, ¿por qué van las oscilaciones sincronizadas a hacer que surja la experiencia visual, no importa cuánta integración tenga lugar? Esta pregunta lleva en sí el problema duro, acerca del cual la teoría no tiene nada que ofrecer. En realidad, Crick y Koch reconocen su agnosticismo respecto a que la ciencia puede siquiera resolver el problema duro.

Se podría hacer el mismo tipo de crítica a casi todos los trabajos recientes sobre la consciencia. Daniel D. Dennett ha presentado una depurada teoría relativa a la manera en que se combinan numerosos procesos independientes y producen una respuesta coherente a un suceso percibido. La teoría podría servir de mucho para explicar cómo producimos comunicaciones verbales sobre nuestros estados internos, pero nos dice muy poco acerca de la razón de que haya una experiencia subjetiva tras esas comunicaciones. Como otras teorías reduccionistas, la de Dennett es una teoría de los problemas fáciles.

El rasgo decisivo que comparten estos problemas fáciles es que todos se refieren a cómo se realiza una función cognoscitiva o del comportamiento. En última instancia todos ellos preguntan por la manera en que el cerebro efectúa alguna tarea: cómo distingue entre estímulos, integra la información o la verbaliza. En cuanto la neurobiología especifica un mecanismo neuronal apropiado que muestra cómo se efectúan las funciones, los problemas fáciles se resuelven.

El problema duro de la consciencia, por el contrario, va más allá de los problemas que se refieren a cómo se desempeñan las funciones. Aun cuando cada función de comportamiento o cognoscitiva relacionada con la consciencia se explicase, quedaría en pie un misterio: ¿por qué la ejecución de esas funciones va acompañada por la experiencia consciente? Es este quebradero de cabeza adicional el que hace que el problema duro lo sea.

Algunos han sugerido que, para resolver el problema duro, necesitamos echar mano de los nuevos



2. LA RUEDA DE LOS COLORES dispone los tonos de color de manera que los que se experimentan como similares estén más juntos. Los colores próximos se corresponden además con representaciones perceptivas similares en el cerebro.

DAVID J. CHALMERS estudió matemáticas en las universidades de Adelaida y Oxford, pero la fascinación por la consciencia le llevó a la filosofía, disciplina que hoy enseña en la Universidad de California en Santa Cruz.

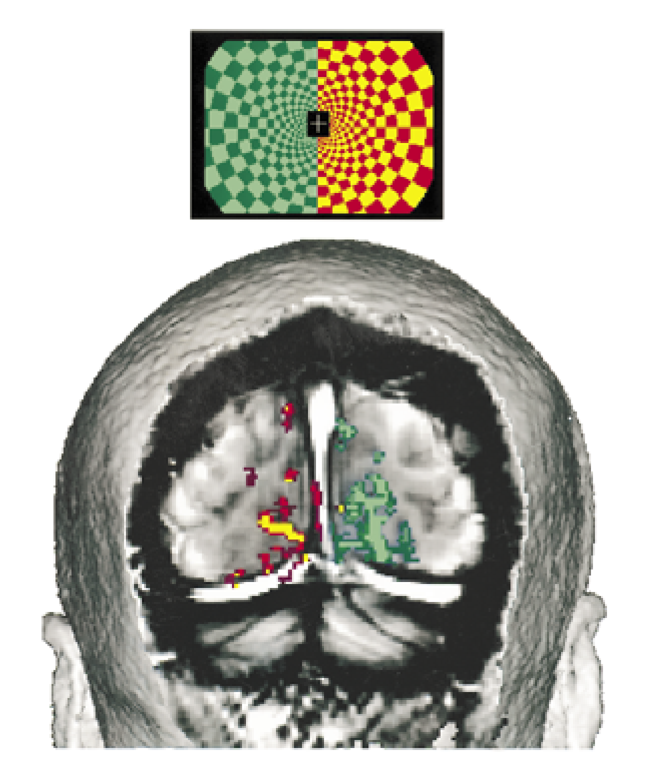
instrumentos de la explicación física, de la dinámica no lineal, por ejemplo, de nuevos descubrimientos de la neurología o de la mecánica cuántica. Pero estas ideas se resienten de idéntica dificultad. Recuérdese a este respecto la propuesta de Stuart R. Hameroff, de la Universidad de Arizona, y Roger Penrose, de la Universidad de Oxford. Mantienen que la consciencia surge de procesos físico-cuánticos que ocurren en los microtúbulos, estructuras proteínicas del interior de las neuronas. Es posible (si no probable) que esta hipótesis conduzca a una explicación de cómo toma decisiones el cerebro o incluso de la manera en que demuestra teoremas matemáticos, tal y como apuntan Hameroff y Penrose. Pero aunque lo haga, callará acerca de cómo esos procesos pueden dar lugar a la experiencia consciente. Lo mismo le pasará a cualquier teoría de la consciencia que se base sólo en el procesamiento físico.

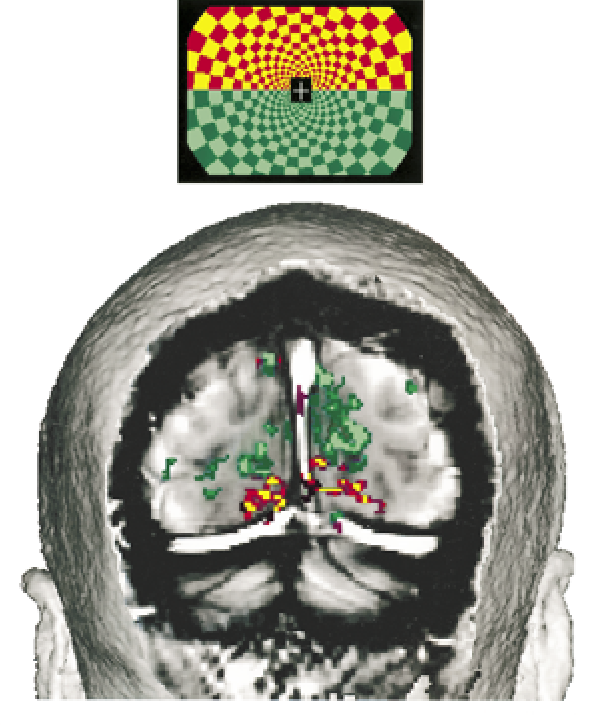
La dificultad estriba en que la tarea para la que las teorías físicas son más adecuadas es la de explicar por qué los sistemas presentan cierta estructura física y cómo realizan diversas funciones. La mayoría de los problemas científicos tiene esa forma; para explicar la vida, por ejemplo, hemos de describir la reproducción, adaptación y metabolismo de un sistema físico. Pero el de la consciencia es un tipo de problema completamente diferente, pues va más allá de la explicación de la estructura y la función.

Por supuesto, la neurología debe entrar en el estudio de la consciencia. Para empezar, quizá pueda descubrir la naturaleza del correlato neuronal de la consciencia, los procesos cerebrales asociados más directamente con la experiencia consciente. Hasta podría establecer la correspondencia entre procesos específicos del cerebro y componentes de la experiencia relacionados con ellos. Ahora bien, mientras no sepamos por qué esos procesos dan lugar a la experiencia consciente, no habremos cruzado lo que el filósofo Joseph Levine llama la laguna de la explicación entre los procesos físicos y la consciencia. Para cubrir ese hiato se requiere una teoría de nuevo cuño.

En la búsqueda de una alternativa, conviene partir de un concepto clave: no todos los objetos de la ciencia se explican a partir de otras entidades más fundamentales. En física, por ejemplo, el espacio-tiempo, la masa y la carga (entre otras cosas) se consideran elementos fundamentales del mundo, pues no pueden reducirse a otros que lo sean más. Esa irreductibilidad no obsta para que existan teorías finísimas y útiles que relacionan tales entidades con otras mediante leyes fundamentales. Esos elementos y esas leyes juntos explican una amplia diversidad de fenómenos complejos y sutiles.

Es una creencia muy extendida que la física proporciona un catálogo completo de los elementos y las leyes fundamentales del universo. Como dice el físico Steven Weinberg en su libro *Dreams of a Final Theory*, el objetivo de la física es una "teoría del todo", de la que se derive cualquier cosa que haya que saber del universo. Pero Weinberg reconoce un problema con la consciencia. Pese a la potencia de la teoría física, la existencia de la consciencia no parece derivarse de sus leyes. Defiende la física con el argumento de que al final podría acabar explicando lo que él llama los correlatos objetivos de la consciencia (es decir, los correlatos neuronales), pero, claro está, eso no es explicar la consciencia misma. Si la existencia de la consciencia no se deriva de leyes físicas, una teoría de la física no constituye una verdadera teoría del todo. Una teoría final,





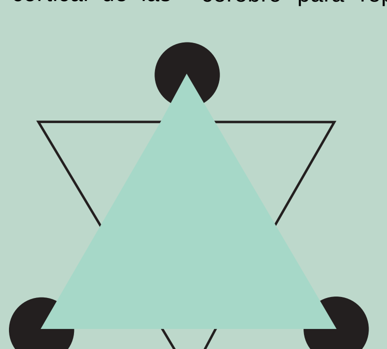
3. LAS VARIACIONES DEL FLUJO DE SANGRE en la corteza visual muestran cómo responde el cerebro de un sujeto a un patrón que está viendo. Los colores de esta imagen revelan la actividad cortical que corresponde a la visión por el sujeto de cada mitad del patrón. El experimento ilumina un correlato neuronal de la experiencia visual; experiencias de ese tenor quizá constituyan la base de la consciencia.

¿Podría la neurología llegar a explicar la consciencia?

por Francis Crick y Christof Koch

Tal como están las cosas, la forma mejor de abordar el problema de la consciencia es, en nuestra opinión, concentrarse en el hallazgo de los correlatos neuronales de la consciencia, los procesos del cerebro responsables y directos de la consciencia. La localización cortical de las neuronas que guardan relación estrecha con la consciencia y el descubrimiento de sus conexiones con las neuronas de otras partes del cerebro podrían darnos ideas clave relativas a lo que David J. Chalmers llama el problema duro: una explicación completa de la manera en que las experiencias subjetivas surgen de los procesos cerebrales.

Le reconocemos a Chalmers el mérito de su audacia al identificar el problema duro y centrarse en él en esta temprana etapa. No sentimos, sin embargo, el mismo entusiasmo por algunos de sus experimentos mentales. El problema duro se puede descomponer en varias cuestiones: ¿Por qué siquiera experimentamos algo? ¿Qué lleva a una experiencia consciente concreta (como la azulidad del azul)? ¿Por qué algunos aspectos de la experiencia subjetiva no pueden ser comunicados a otras personas (en otras palabras, por qué son privados)? Podemos responder a la última pregunta y aportamos una sugerencia para las dos primeras. Nuestras reflexiones giran en torno a la representación neuronal explícita.



EL TRIANGULO de Kanizsa estimula las neuronas que codifican explícitamente esos contornos ilusorios

¿Qué significa "explícito" en este contexto? Veámoslo con un ejemplo. En respuesta a la imagen de rostro, las células ganglionares se disparan por toda la retina, en muy buena medida como los píxeles de una pantalla de televisión, para generar una representación implícita de la cara. Al mismo tiempo, pueden responder a muchísimos otros rasgos de la imagen, como las sombras, las líneas, la iluminación desigual, etcétera. Por el contrario, ciertas neuronas instaladas en un lugar alto de la jerarquía de la corteza visual responden principalmente al rostro o incluso al rostro visto desde un ángulo determinado. Estas neuronas le sirven al cerebro para representar el rostro de una forma explícita. Su pérdida, debida a un accidente cerebrovascular o a otro tipo de lesión, lleva a la prosopagnosia, a la incapacidad de un individuo de reconocer conscientemente rostros familiares, incluso el suyo propio, aunque todavía pueda reconocer los rostros como tales. Análogamente, los daños que sufran otras partes de la corteza visual pueden hacer que uno pierda la capacidad de experimentar el color, pero sin dejar de ver matices del blanco y del negro, aun cuando no haya ningún defecto en los receptores del color en el ojo.

En cada área, la información visual se recodifica, por lo normal de forma semijerárquica. Las células ganglionares retinales reaccionan a una mancha de luz. Las neuronas de la corteza visual primaria son las indicadas para responder a las líneas o bordes. Las neuronas de un nivel superior podrían preferir un contorno móvil. Más arriba aún están las que reaccionan ante los rostros y otros objetos familiares. En la cúspide residen las que se proyectan hacia las estructuras premotrices y motrices del cerebro, donde excitan las neuronas que ponen en marcha determinadas acciones: hablar o esquivar un coche.

Chalmers cree, y nosotros también, que los aspectos subjetivos de una experiencia tienen que estar estrechamente relacionados con el disparo de las neuronas correspondientes a esos aspectos (los correlatos neuronales). Describe un experimento mental muy conocido, el de una hipotética neurocientífica, María, que está especializada en la percepción

pues, debe contener un componente fundamental extra.

Con este fin, propongo que se considere a la experiencia consciente un elemento fundamental, irreductible a algo más básico. Puede que al principio la idea parezca extraña, pero la coherencia parece exigirla. En el siglo XIX se obtuvo que los fenómenos electromagnéticos no podían explicarse a partir de principios conocidos. La consecuencia fue que los físicos introdujeron una nueva entidad fundamental, la carga electromagnética, y estudiaron las leyes fundamentales correspondientes. Debería aplicarse a la consciencia un razonamiento parejo. Si las teorías fundamentales existentes no pueden abarcarla, quiere decirse que se requiere algo nuevo.

Donde hay una propiedad fundamental, hay leyes fundamentales. En este caso, las leyes tienen que relacionar la experiencia con los elementos de la teoría física. Es casi seguro que estas leyes no cerrarán el paso a las del mundo físico, que forman, por lo que parece, un sistema cerrado por propio derecho. Las leyes, más bien, servirán de puente, y especificarán cómo depende la experiencia de los procesos físicos subyacentes. Ese será el puente que cruce la laguna en la explicación.

Por tanto, una teoría completa tendrá dos componentes: las leyes físicas, que nos dirán qué les pasa a los sistemas físicos, desde los infinitesimales hasta los cosmológicos, y las que podríamos llamar leyes psicológicas, que nos dirán cómo se asocian algunos de esos sistemas a la experiencia consciente. Estos dos componentes constituirán una verdadera teoría del todo.

Admitamos que existan tales leyes psicofísicas. ¿Cómo descubrirlas? El principal obstáculo lo encontraremos en la carencia de datos. Tal y como la he descrito, la consciencia es subjetiva; no hay, pues, forma de observarla en otros. Pero hablamos de un obstáculo, no de un callejón sin salida. Para empezar, cada uno de nosotros tiene acceso a sus propias experiencias, un rico tesoro que puede servir para formular teorías. Es verosímil que nos basemos además en informaciones indirectas, como las descripciones que hacen los sujetos de sus experiencias. También tienen un papel que desempeñar los argumentos filosóficos y los experimentos mentales. Estos métodos, aunque limitados, son suficientes para empezar.

Al no poderse contrastar de forma concluyente, estas teorías serán más conjeturales que las teorías de las

del color y nunca ha visto uno. Pero nosotros creemos que la razón por la que María no sabe qué es ver un color es que nunca ha tenido una representación neuronal explícita de uno en su cerebro; sólo la ha tenido de las palabras e ideas asociadas a los colores.

Para describir una experiencia visual subjetiva, la información debe transmitirse al área del cerebro que se encarga de la reacción motriz, donde queda disponible para la verbalización u otras acciones. Esta transmisión supone siempre una recodificación de la información, de suerte que la información explícita expresada por las neuronas motrices guarde relación con la información explícita, pero sin ser idéntica a ella, expresada por el disparo de las neuronas asociadas a la experiencia del color, en algún nivel de la jerarquía visual.

No es posible, pues, comunicar con palabras e ideas la naturaleza exacta de una experiencia subjetiva. Es posible, sin embargo, comunicar una diferencia entre experiencias subjetivas, la de distinguir el rojo del naranja, por ejemplo. Es posible porque una diferencia en un área cortical visual de alto nivel seguirá estando asociada a una diferencia en las zonas motrices. En consecuencia, nunca podremos explicar a otras personas la naturaleza de cualquier experiencia consciente, sino sólo su relación con otras experiencias.

Las otras dos preguntas, por qué tenemos experiencias conscientes y qué es lo que lleva a tener experiencias específicas, parecen más difíciles. Chalmers propone la necesidad de introducir la "experiencia" como un nuevo elemento fundamental del mundo, relacionado con la capacidad de un organismo para procesar la información. Pero, ¿qué tipos de información neuronal producen la consciencia? ¿Y qué hace que cierto tipo de información corresponda a la azulidad del azul en vez de a la verdura del verde? Estos problemas son de los más peliagudos en el estudio de la consciencia.

Preferimos otro enfoque, que se basa en el concepto de "significado". ¿En qué sentido cabe decir que las neuronas que codifican explícitamente una cara comunican el significado de una cara al resto del cerebro? Esa propiedad ha de guardar relación con el campo proyectivo de la célula, es decir, con su patrón de conexiones sinápticas con las neuronas que codifican explícitamente los conceptos asociados. En última instancia, esas conexiones llegan al punto motriz. Por ejemplo, las neuronas que reaccionan ante cierto rostro podrían estar conectadas con las que expresan el nombre de la persona de quien es ese rostro y con otras concernientes a su voz, los recuerdos que se refieran a ella, y así por demás. Tales asociaciones entre las neuronas deben resultar útiles en el comportamiento; en otras palabras, han de ser coherentes con la retroalimentación del cuerpo y del mundo externo.

El significado dimana de los vínculos entre esas representaciones y otras dispersas por el sistema cortical en una vasta red asociativa, similar a un diccionario o una base de datos relacional. Cuanta mayor diversidad reine en las conexiones, más rico será el significado. Si, como en nuestro ejemplo anterior de la prosopagnosia, el resultado sináptico de esas neuronas del rostro estuviese bloqueado, las células seguirían reaccionando ante la cara de la persona, pero no habría un significado asociado y la experiencia, pues, sería mucho menor. Se vería una cara, pero no se la reconocería como tal.

Por supuesto, un grupo de neuronas puede tomar nuevas funciones, con lo que el cerebro aprende categorías nuevas (rostros entre ellas), y asociar categorías nuevas a las existentes. Ciertas asociaciones primitivas, como el dolor, son en cierta medida innatas y luego se refinan a lo largo de la vida.

Puede, en efecto, que la información sea el concepto clave, como Chalmers sospecha. Una mayor certidumbre requerirá la consideración de flujos de información paralelos, conectados —como las neuronas— en redes complejas. Sería útil intentar determinar qué características ha de tener una red neuronal (o alguna otra incorporación computacional) para generar significado. Es posible que ejercicios así sugieran cuál es la base neuronal del significado. El problema duro de la consciencia aparecería entonces quizá bajo una luz completamente nueva. Hasta podría desaparecer.

FRANCIS CRICK es profesor Kieckhefer del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego. CHRISTOF KOCH enseña computación y neurosistemas en el Instituto de Tecnología de California.

disciplinas científicas al uso. Sin embargo, no hay razón por la que no deban estar sujetas a una explicación fiel de nuestras experiencias personales y las comunicadas por los otros. Si hallamos una teoría que concuerde con los datos mejor que cualquier otra dotada de idéntica sencillez, tendremos buenas razones para aceptarla. Hasta ahora no contamos con ninguna que case con los datos. Resulta, pues, prematuro ocuparse de la contrastabilidad.

Podríamos empezar por buscar leyes puente de alto nivel que conectasen los procesos físicos con la experiencia en el orden cotidiano de cosas. Podría sacarse la configuración básica de una ley así de la observación de que, cuando somos conscientes de algo, por lo general tenemos la capacidad de actuar al respecto y hablar de ello, y éstas son funciones objetivas físicas. A la recíproca, cuando una información está disponible directamente para la acción y el habla, en general es consciente. Por tanto, la consciencia guarda una buena correlación con lo que podríamos llamar "percatarse": el proceso gracias al cual la información del cerebro viene a estar globalmente disponible para los procesos motores del estilo del habla o de la acción corporal.

La idea quizá parezca trivial. Pero, de acuerdo con la definición aquí dada, el percatarse es objetivo y físico, y la consciencia no. Hay que extender algo la significación de percatarse para que abarque a los animales y a los niños pequeños, que no pueden hablar. Pero al menos en los casos comunes es posible ver el bosquejo primario de una ley psicofísica: donde se da la acción de percatarse hay consciencia, y al revés.

Para llevar esta línea de razonamiento un paso más allá, pensemos en la estructura presente en la experiencia consciente. La experiencia de un campo visual, por ejemplo, es un mosaico de colores, formas y patrones que cambia sin cesar, y en cuanto tal tiene una estructura geométrica detallada. El que podamos describir esa estructura, extender la mano en la dirección de muchos de sus componentes y realizar otras acciones que dependen de ella sugiere que está en correspondencia directa con la estructura cerebral de la información que han creado los procesos neuronales del percatarse.

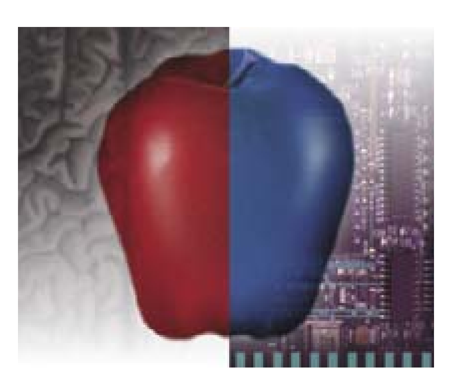
Similarmente, nuestras experiencias del color poseen una estructura tridimensional intrínseca que se refleja en la estructura de los procesos

El baile de los qualia en un cerebro sintético

El que pueda surgir o no la consciencia en un sistema sintético y complejo es una cuestión que a muchas personas les parece fascinante en sí misma. Aunque puede que falten aún décadas o incluso siglos antes de que se pueda construir un sistema así, hay un simple experimento mental que presta un sólido respaldo a la hipótesis según la cual un cerebro artificial debidamente organizado percibiría el mismo tipo de experiencias conscientes que un ser humano.

Piénsese en un sistema basado en el silicio donde los microcircuitos estén organizados y funcionen como las neuronas de nuestro cerebro. Es decir, cada microcircuito del sistema de silicio hace exactamente lo que su análoga natural hace y se interconecta con los elementos que lo rodean de idéntico modo. Por tanto, el sistema artificial mostrará un comportamiento idéntico al del lector. Ahora bien, ¿será consciente de la misma forma que lo es el lector?

Supongamos, en beneficio del argumento, que no. (Nos serviremos de una argumentación conocida por reducción al absurdo, en la que se parte de la hipótesis contraria y se muestra que conduce a una conclusión insostenible.) Es decir, o tiene experiencias diferentes —una experiencia del azul, digamos, cuando el lector ve el rojo— o no tiene ninguna en absoluto. Aquí consideraremos el primer caso; el razonamiento procede de forma similar en ambos casos.



UN EXPERIMENTO MENTAL, una manzana salta de roja a azul

Como los microcircuitos y las neuronas tienen la misma función, son, con la interfaz adecuada, intercambiables. Los microcircuitos, pues, pueden reemplazar las neuronas, y se produce así un continuo de casos donde un proporción de microcircuitos cada vez mayor reemplaza a las neuronas. A lo largo de ese continuo, la experiencia consciente del sistema también cambiará. Podríamos, por ejemplo, sustituir todas las neuronas de su corteza visual por una versión de silicio, organizada de forma idéntica. El cerebro resultante, con una corteza visual artificial, tendrá una experiencia consciente diferente de la original: donde el lector antes veía rojo, puede que ahora experimente el púrpura (o quizá un desvaído rosa, en el caso en que un sistema entero de silicio no tenga experiencia alguna).

A continuación se conectan ambas cortezas visuales a su cerebro mediante un conmutador de dos posiciones. Con el conmutador en una de ellas, el lector usa la corteza visual natural; cuando está en la otra, se activa la artificial. Cuando se hace que el conmutador pase de una posición a la otra, su experiencia cambia del rojo al púrpura o viceversa. Cuando se mueve el conmutador repetidas veces, el lector experimenta un "baile" entre los dos estados conscientes diferentes (rojo y púrpura), a los que se da el nombre de qualia.

Como la organización de su cerebro no ha cambiado, sin embargo, no puede haber un cambio de comportamiento al mover el conmutador. Por tanto, cuando se le pregunte al lector qué ha visto, él dirá que no ha cambiado nada. El lector mantendrá que ha visto rojo y nada más que rojo, aun cuando los dos colores han estado bailando ante sus ojos. Esta conclusión es tan poco razonable, que lo mejor es considerarla una reducción al absurdo de la suposición original: que un sistema artificial cuyos organización y funcionamiento sean idénticos a los de un cerebro neuronal tiene una experiencia consciente diferente. La retractación de la suposición establece su contraria: los sistemas con una misma organización tienen la misma experiencia consciente.

—D.J.C.

de información de la corteza visual. Esta estructura se representa en las ruedas y diagramas de colores que usan los artistas. Los colores se disponen en un patrón sistemático (del rojo al verde en un eje, del azul al amarillo en otro y del negro al blanco en un tercero). Se experimenta que los colores cercanos entre sí en la rueda de colores son parecidos. Es sumamente probable que correspondan además a representaciones perceptivas del cerebro parecidas, como partes de un sistema que implanta una compleja codificación tridimensional entre las neuronas que no se conoce todavía del todo. Podemos reformular la idea que está detrás de esto como un principio de coherencia estructural: la estructura de la experiencia consciente se refleja en la estructura de la información presente en la acción de percatarse, y al revés.

Otro candidato a ley psicofísica es el principio de invariancia organizativa. Según reza, los sistemas físicos que tengan una misma organización abstracta darán lugar al mismo tipo de experiencia consciente, no importa de qué estén hechos. Por ejemplo, si las interacciones entre nuestras neuronas se pudiesen duplicar con toda precisión mediante microcircuitos de silicio, surgiría la misma experiencia consciente. La idea es un tanto polémica, pero creo que está muy respaldada por los experimentos mentales donde se reemplazan gradualmente las neuronas por microcircuitos de silicio. Lo que entraña que algún día podría lograrse la consciencia en las máquinas.

El objetivo final de una teoría de la consciencia se cifra en un conjunto simple y elegante de leyes fundamentales, análogo a las leyes fundamentales de la física. Sin embargo, es poco probable que los principios descritos antes sean fundamentales. Más bien parecen ser leyes psicofísicas de alto nivel, análogas a principios macroscópicos de la física del estilo de los que aparecen en la termodinámica o la cinemática. ¿Cuáles podrían ser las leyes fundamentales subyacentes? Nadie lo sabe, pero no me importa hacer cábalas.

Apunto que el concepto de información quizá desempeñe en las leyes psicofísicas primarias un papel central. Según la noción abstracta que propuso Claude E. Shannon, del Instituto de Tecnología de Massachussetts, en los años cuarenta, la información consiste en un conjunto de estados distintos que comparten una estructura

básica de similaridades y diferencias entre ellos. Podemos considerar un código binario de 10 bits, por ejemplo, como un estado de información. Estos estados de información pueden incorporarse en el mundo físico. Es lo que sucede cuando se corresponden con estados físicos (voltajes, digamos); las diferencias entre ellos se pueden transmitir por alguna vía, la línea de teléfono, por ejemplo.

En la experiencia consciente también hallamos información. Así, podemos considerar que el patrón de manchas de color de un campo visual es análogo al de los píxeles que cubren una pantalla. Intriga el que encontremos los mismos estados de información inmersos en la experiencia consciente y en los procesos físicos del cerebro que están tras ella. La codificación tridimensional de los espacios de color, por ejemplo, sugiere que el estado de información de una experiencia del color se corresponde directamente con un estado de información del cerebro. Hasta podríamos considerar los dos estados como aspectos distintos de un solo estado de información, inmerso a la vez en el procesamiento físico y en la experiencia consciente.

De ello se sigue de forma natural una hipótesis. Una información encierra quizá dos aspectos básicos, o al menos algunas informaciones los tienen: uno físico y otro experiencial. Esta hipótesis posee categoría de principio fundamental, un principio que podría estar tras la relación existente entre los procesos físicos y la experiencia. Dondequiera que encontremos una experiencia consciente, existirá como uno de los aspectos de un estado de información; el otro aspecto es el que se hallará inmerso en un proceso físico del cerebro. Hay que darle sustancia a esta propuesta para construir una teoría satisfactoria. Pero concuerda muy bien con los principios mencionados antes —que los sistemas con la misma organización incorporan la misma información, por ejemplo— y podría explicar numerosos rasgos de nuestra experiencia consciente.

La idea es, al menos, compatible con otras, como la del físico John A. Wheeler, quien sugiere que la información es fundamental en la física del universo. En última instancia, las leyes de la física podrían tal vez reformularse a partir del concepto de información; en ese caso tendríamos una congruencia satisfactoria entre las construcciones conceptuales de las leyes físicas y las de las leyes psicológicas. Hasta pudiera suceder que una teoría de la física y una teoría de la consciencia acabasen por amalgamarse en una gran teoría de la información.

La ubicuidad de la información plantea un problema potencial. Pensemos en un termostato. Incorpora cierta información, pero ¿es consciente? Caben al menos dos respuestas. Primera: podríamos restringir las leyes fundamentales de manera que sólo cierta información tuviese un aspecto experiencial, dependiendo quizá de su procesamiento físico. Segunda: que admitiésemos que toda información tiene un aspecto experiencial, es decir, donde hubiera un procesamiento complejo de la información habría una experiencia compleja y donde aquél fuera simple la experiencia sería simple. En ese cuadro, hasta un termostato podría tener experiencias, pero mucho más simples incluso que una experiencia básica del color, y ciertamente no las acompañarían emociones o pensamientos. Parecerá extraño al principio, pero si la experiencia es de verdad fundamental, podríamos esperar que estuviese muy difundida. Sea como sea, la elección entre estas posibilidades dependería de cuál se integrase en la teoría más potente.

Acepto la posibilidad de que ande errado. Pero podría ocurrir que esas ideas evolucionaran hasta convertirse en una propuesta más poderosa que predijera la estructura precisa de nuestra experiencia consciente a partir de los procesos físicos de nuestros cerebros. Si este proyecto tiene éxito, contaremos con una buena razón para aceptar la teoría. Si fracasa, se seguirán otros caminos y quizá se desarrollen otras teorías fundamentales. Así resolveremos algún día el mayor misterio de la mente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ABSENT QUALIA, FADING QUALIA, DANCING QUALIA. David J. Chalmers, en *Conscious Experience*. A cargo de Thomas Metzinger. Ferdinand Schöningh, 1995.

EXPLAINING CONSCIOUSNESS: THE "HARD PROBLEM." Número especial del *Journal of Consciousness Studies*. vol. 2, n.º 3; otoño de 1995.

THE NATURE OF CONSCIOUSNESS: PHILOSOPHICAL AND SCIENTIFIC DEBATES. A cargo de Ned Block, Owen Flanagan y Güven Güzeldere. MIT Press (en prensa).

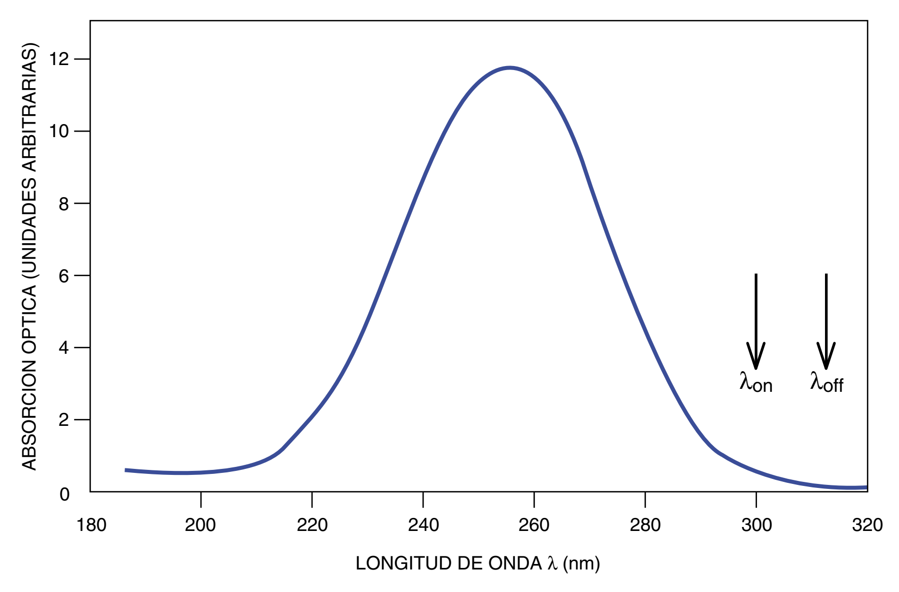
Penetración del agujero de ozono en Sudamérica

Las mediciones de la columna de ozono, realizadas a través de una red de detectores en tierra, indican que el agujero de ozono formado en la Antártida ha penetrado en el sur de Argentina y Chile

J. O. Tocho, L. Da Silva, G. Lifante, F. Cusso y F. Jaque

El deterioro de la capa de ozono es hoy día uno de los más serios problemas ambientales con que se enfrenta nuestro planeta. Localizada en la estratosfera, la capa de ozono actúa a la manera de un potente filtro que deja pasar sólo una pequeña parte de la radiación ultravioleta que nos viene del Sol denominada B; esta zona del espectro se extiende desde los 290 nanómetros hasta 310 nanómetros. Dicha radiación, si su intensidad y el tiempo de exposición a la misma son elevados, produce eritemas, conjuntivitis y deterioro del sistema de defensas en los seres humanos, limita el crecimiento de las plantas y daña el fitoplancton, con las consecuencias que de ello se derivan para el normal desarrollo de la fauna marina.

Los primeros datos sobre el deterioro de la capa de ozono se remontan al año 1982, cuando se publicaron los valores sobre la columna de ozono obtenidos por la estación japonesa de Syowa en la Antártida. Los niveles de la columna de ozono, registrados desde el año 1964, indicaban que a partir del año 1975 ésta presentaba un debilitamiento evidente. Más tarde, otras estaciones ubicadas también en el continente antártico darían a conocer resultados similares. Todas coincidían en que el deterioro comenzó en la década de los setenta. El daño de la capa registrado en la Antártida aparecía en todas las estaciones al comienzo de la primavera austral y mostraba por aquellas fechas una corta duración y un rápido restablecimiento.



1. ESPECTRO DE ABSORCION de la molécula de ozono en el margen 180-320 nanómetros. Las flechas indican las longitudes de onda a las cuales se realizan medidas de absorción diferencial: se eligen a $\lambda_{on} = 300$ nanómetros y $\lambda_{off} = 315$ nanómetros, en donde la sección eficaz de absorción del ozono es varias veces superior en λ_{on} comparado con λ_{off} (*véase recuadro de la página 73*).

El conocimiento de que se estaba produciendo un daño en la columna de ozono sobre el continente antártico alarmó a la comunidad mundial, pues sus consecuencias, de no frenarse el proceso, podían ser de un alcance importante.

Años antes de la publicación del primer informe sobre el problema del deterioro, ocurrió un hecho fundamental para el entendimiento posterior del fenómeno. J. E. Lovelock se había propuesto investigar la dinámica de la alta atmósfera, para lo cual buscó compuestos químicos que se enviaran periódicamente a la atmósfera y que tuvieran una larga vida antes de descomponerse. Siguiendo la pista de estos elementos podría conocerse cuáles eran las corrientes que los llevaron desde el lugar de uso hasta el punto de destino. Había que elegir los compuestos que sirvieran de marcadores; compuestos, además, que se consumieran en cierta cantidad y gozaran de larga vida, para así poder seguirlos a través de su recorrido.

Lovelock encontró los marcadores ideales en los halocarburos (CFC). Se trata de compuestos que se utilizan ampliamente en pulverizadores y disolventes, así como por las industrias del frío y de aislantes térmicos. Para su sorpresa, la huella de esos halocarburos le llevó al continente antártico, donde había una alta e inesperada concentración de los mismos.

La alta estabilidad de estos compuestos les aseguraba, en principio, un papel inofensivo. Sin embargo, en 1972 F. S. Rowland y M. J. Molina llamaron la atención sobre el desprendimiento de ion cloro (Cl^-) cuando se exponía a la radiación ultravioleta; la liberación de cloro destruía las moléculas de ozono (O_3). La investigación posterior corroboró la suma eficacia

del mecanismo en cuestión. Aunque se encontraron compuestos tampón que detenían la reacción del cloro con el ozono, volvía ésta a desencadenarse ayudada por el fenómeno catalizador de la superficie de los cristales formados en las nubes estratosféricas, donde esos reservorios quedaban incrustados.

Desde el informe japonés de 1982, se han multiplicado los registros de la evolución de la capa de ozono a través de técnicas diversas: globos, estaciones en tierra y satélites artificiales. La mayoría de los registros se han polarizado sobre el continente antártico, y apenas si se ha prestado atención a otras latitudes habitadas, donde los efectos del deterioro de ese manto protector podrían resultar todavía más dañinos. La razón de que la mayoría de los estudios sobre el debilitamiento de la capa de ozono se hayan realizado sobre la Antártida obedece, sin duda, a la magnitud del agujero.

Los medidores en tierra están basados en la técnica de absorción diferencial (AD). La molécula de ozono presenta una banda de absorción ancha, con un máximo centrado en la longitud de onda de 250 nanómetros, y se extiende hasta los 300 nanómetros por el lado de baja energía. Si se mide la irradiancia solar I_λ a dos longitudes de onda próximas, una que presente absorción debida al ozono (λ_{on}) y la otra que no, o que sea ésta sensiblemente menor (λ_{off}), el cociente de ambas irradiancias da una medida, después de un calibrado previo, del valor de la columna de ozono. Los posibles efectos de atenuación que producen otros procesos físicos, como la dispersión Rayleigh y Mie por parte de aerosoles o nubes, se corrigen al trabajar con dos longitudes de onda próximas. (La dispersión Rayleigh debe su nombre a su descubridor, John William Strutt, tercer barón Rayleigh.) Cuando la luz es dispersada por partículas que tienen un índice de refracción distinto del medio en que se hallan, y éstas poseen dimensiones lineales bastante menores que la longitud de onda de la luz incidente, la intensidad dispersada es proporcional a la intensidad incidente, al cuadrado del volumen de la partícula dispersante e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda de la luz.

La técnica de absorción diferencial puede emplearse también en satélites artificiales. En este caso, I_λ representa la intensidad de la luz solar retrodispersada. Midiendo a dos longitudes de onda próximas, su cociente proporciona también una medida del valor de la columna de ozono. Gracias a los satélites artificiales disponemos ahora de los valores de la columna de ozono para todo el globo terrestre de manera casi continua.

Sin embargo, los datos suministrados por estaciones en tierra, aunque sean de carácter discreto, revisten particular interés. Además de permitir compararlos con los enviados por los satélites, las estaciones en tierra ofrecen en paralelo una información sobre la intensidad de la radiación ultravioleta que se recibe en el lugar de la instalación.

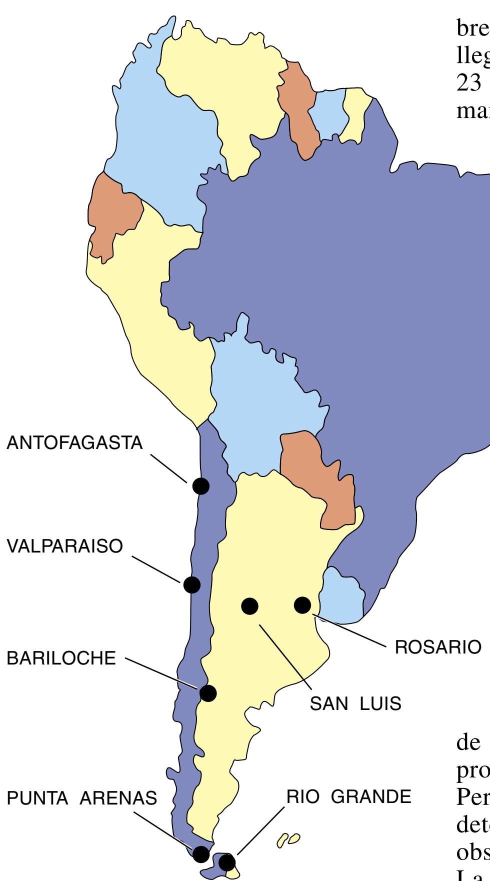


2. FOTOGRAFIA DEL MEDIDOR de ozono en su soporte ecuatorial utilizado para las mediciones terrestres de la columna de ozono.

Durante los años 1993 y 1994 se llevó a cabo una campaña de medición de la columna de ozono mediante medidores en tierra, que cubrían desde el paralelo 23 Sur hasta el 54 Sur en la punta meridional de Argentina y Chile. Los medidores de absorción diferencial se construyeron en colaboración entre la Universidad Autónoma de Madrid y el Centro de Investigaciones Opticas de La Plata. Se quiso que fueran de fácil manejo y bajo coste, para así poder ubicarlos en diversos lugares de ambos países. La radiación solar, colimada, se concentra por medio de una lente de cuarzo sobre un fotodiodo de silicio denominado azul, cuya sensibilidad se extiende hasta los 250 nanómetros. Entre la lente y el fotodiodo se intercala un filtro interferencial de una anchura de banda del orden de 10 nanómetros, que selecciona la longitud de onda de la radiación solar a medir. La señal del fotodiodo se amplifica y se envía a un ordenador para su registro.

En la red de medidores implantada en Argentina y Chile se utilizaron dos detectores que operaban a 315 nm y 300 nm. La sección eficaz de absorción σ del ozono a 300 nm es siete veces mayor que la correspondiente a 315 nm, de forma que se cumple la doble condición exigida: que las dos longitudes de onda sean suficientemente próximas y que la absorción debida al ozono sea muy diferente. La pareja de detectores se acopla a un soporte ecuatorial que permite el seguimiento del Sol. Todos los equipos utilizados fueron conjuntamente calibrados en la ciudad de La Plata antes de su puesta en funcionamiento en sus respectivos emplazamientos.

Los datos sobre la columna de ozono durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 1993 para la estación argentina de Río Grande presentaron un buen acuerdo con los valores suministrados por el satélite *Meteor-3* para esa misma localidad. Hubo, en particular, un excelente acuerdo entre ambas medidas elaboradas a través de la luz solar transmitida (estación en tierra) y los valores de la luz solar retrodispersada (satélite artificial). A principio de la primavera austral se detectaron diversos descensos en la columna de ozono, siendo los más intensos los



3. MAPA DEL CONTINENTE sudamericano donde se indica la localización de la red de medidores de ozono.

observados los días 27 de septiembre, 23 de octubre y 8 de noviembre, en los que la capa de ozono alcanzó valores de sólo 200 unidades Dobson (UD), cuando su valor promedio en esa época es superior a 300 UD. (Mil unidades Dobson equivalen a una columna uniforme de ozono de 1 centímetro de espesor en condiciones normales de presión, esto es, 1 atmósfera, y temperatura, o sea, 273 grados kelvin.)

Los medidores instalados en las otras localidades detectaron también un descenso en la cantidad total de ozono, siendo más acentuado el fenómeno alrededor del día 27 de septiembre. El daño en la capa de ozono llegó a detectarse en Antofagasta, a 23 S, lo que indica que el daño en el manto de ozono llegó hasta latitudes que incluyen núcleos de población tan importantes como Buenos Aires y Santiago de Chile. Los datos suministrados por el satélite *Meteor-3* confirmaron las mediciones de las estaciones en tierra.

J. O. TOCHO, L. DA SILVA, G. LIFANTE, F. CUSSO Y F. JAQUE colaboran en una investigación sobre el seguimiento del agujero de ozono austral. Tocho se halla en la Universidad Nacional de La Plata; Da Silva, en la Universidad Técnica F. Santa María, y los tres últimos en la Universidad Autónoma de Madrid, en el departamento de física de materiales del que es catedrático Jaque.

¿Cómo pudo llegar este deterioro de la columna de ozono a lugares que distaban entre sí miles de kilómetros? No se disponía entonces de respuesta para cuestión tan alarmante. Sabemos que la aparición del agujero de ozono al comienzo de la primavera austral sobre la Antártida está relacionado con la fotólisis de los CFC, según el mecanismo propuesto por Molina y Rowland. Pero carecemos de explicación del deterioro de la columna de ozono observado a latitudes lejanas del polo. La coincidencia en el tiempo de los eventos reseñados y lo angosto de su duración en algunos de los mismos hizo en principio desechar su relación con el agujero que se forma en esas fechas sobre el continente antártico. Se han postulado otras posibles causas.

Se lee a veces que la actividad solar, y en concreto las fulguraciones solares, que van acompañadas de la emisión de partículas, podrían dañar la capa de ozono, al desempeñar las partículas cargadas (los protones) el mismo papel catalizador que la radiación ultravioleta en la destrucción de ozono. En esa línea, se investigó la posible presencia de estas fulguraciones durante las fechas en que se detectaron descensos en la columna de ozono. De la búsqueda resultó que, aunque el día 27 de septiembre y el 3 de octubre se registraron fulguraciones solares de intensidad media, denominadas M, no sucedió así durante los días alrededor del 23 de octubre y 7 de noviembre. Además, sólo las fulguraciones solares de alta intensidad, denominadas X, aportan la energía necesaria para atentar contra la capa de ozono. Hubo, pues, que volver a la idea de la conexión entre el daño detectado a latitudes bajas y el agujero formado sobre la Antártida.

Hemos dicho ya que contamos con registros de la situación de la capa de ozono suministrados por satélites artificiales. A partir de estos datos pueden configurarse mapas de la columna de ozono estratosférico que permiten una representación global, muy útil para estudiar la dinámica del agujero. Los mapas presentan los valores del ozono total, bien en una visión expandida del globo terrestre o sobre cada uno de los hemisferios. Los valores de ozono dados en unidades Dobson se asignan a distintos colores para su representación gráfica. De ese modo se cartografiaron los mapas de ozono para el hemisferio sur durante los días 26, 27 y 28 de septiembre y 1 de octubre de 1993, fechas vecinas de la jornada en que se descubrió el máximo deterioro de la capa durante 1993.

El mapa de ozono del casquete polar sur presentaba para el día 25 de septiembre de 1993 el comienzo de un agujero de ozono en el centro del continente antártico. Sin embargo, el sur de Argentina y Chile se encontraba ese día en unos niveles de ozono normales, de alrededor de 325 UD. El mapa correspondiente al día 27 mostraba ya la extensión del agujero sobre el continente antártico y la penetración de un área baja en ozono sobre el sur del continente americano, con valores acordes con los suministrados por la estación de Río Grande. El mapa correspondiente al día 29 de septiembre revelaba que el agujero seguía centrado sobre el continente antártico, aunque se dejaba ver una recuperación del nivel de la columna sobre el sur de Argentina y Chile. Por último, el mapa del día 1 de octubre evidenciaba el alejamiento del área pobre en ozono del continente suramericano, situación acorde también con los valores obtenidos en Río Grande. Todavía persistía un hueco profundo sobre el centro de la Antártida.

Por lo que respecta a la campaña de medición del ozono estratosférico de 1993, quedaba corroborada la eficacia de la red de medidores en tierra. Se demostró, asimismo, que en la primavera de ese año, la destrucción de la capa de ozono alcanzó latitudes cercanas a 23 S. Por su lado, los mapas suministrados por el satélite *Meteor-3* ponían de manifiesto que el deterioro visto a latitudes bajas debíase a la dilución del agujero de ozono, que se forma sobre el continente antártico al comienzo de la primavera y no guardaba relación con las fulguraciones solares.

La red de detectores en tierra instalada en Argentina y Chile volvió a utilizarse durante la primavera de 1994. Para nuestro infortunio, las con-

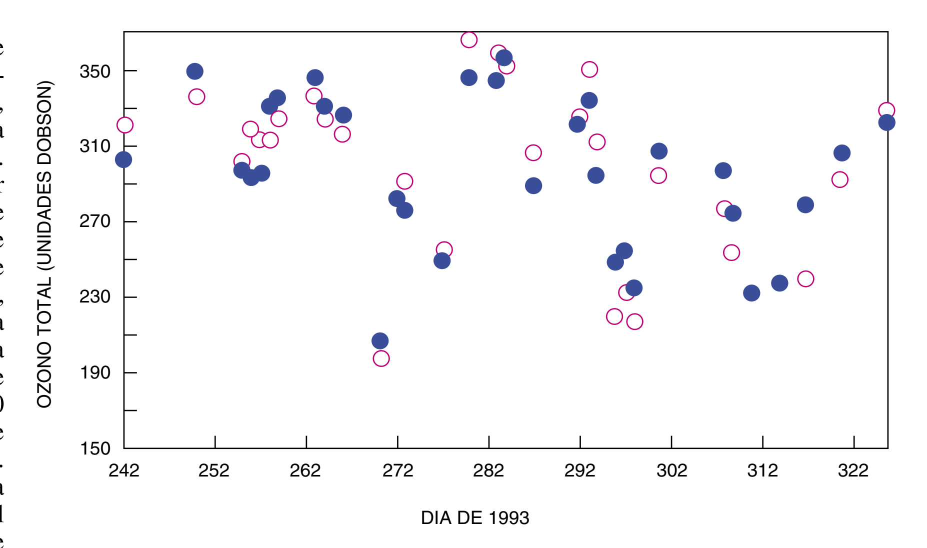
diciones meteorológicas no fueron ese año tan favorables como en el precedente. Llovió mucho en ambos países, y hubo pocos días hábiles para la observación desde estaciones en tierra. Con todo, los datos suministrados por la estación en tierra sobre el valor de la columna de ozono para Río Grande coincidían con los enviados sobre ese lugar por el satélite *Meteor-3*. En 1994, se detectó un fuerte descenso en la columna de ozono alrededor del día 17 de octubre, cuando en Río Grande se llegó a alcanzar un valor de 150 UD, lo que suponía un deterioro de más del 50 % en la capa de ozono. Esta fuerte depresión fue acompañada de otras mas débiles. El episodio del día 17 no sólo fue más intenso que el observado el día 27 de septiembre de 1993, sino de mayor duración también. Un resultado totalmente análogo se registró en la cercana estación de Punta Arenas.

Durante los meses de septiembre y octubre de 1994 se investigaron las incidencias de las fulguraciones solares. Sólo se advirtió la aparición de una de ellas de intensidad M el día 19 de octubre; no ejercían, pues, ningún efecto en el notorio debilitamiento registrado alrededor del día 17 de ese mes.

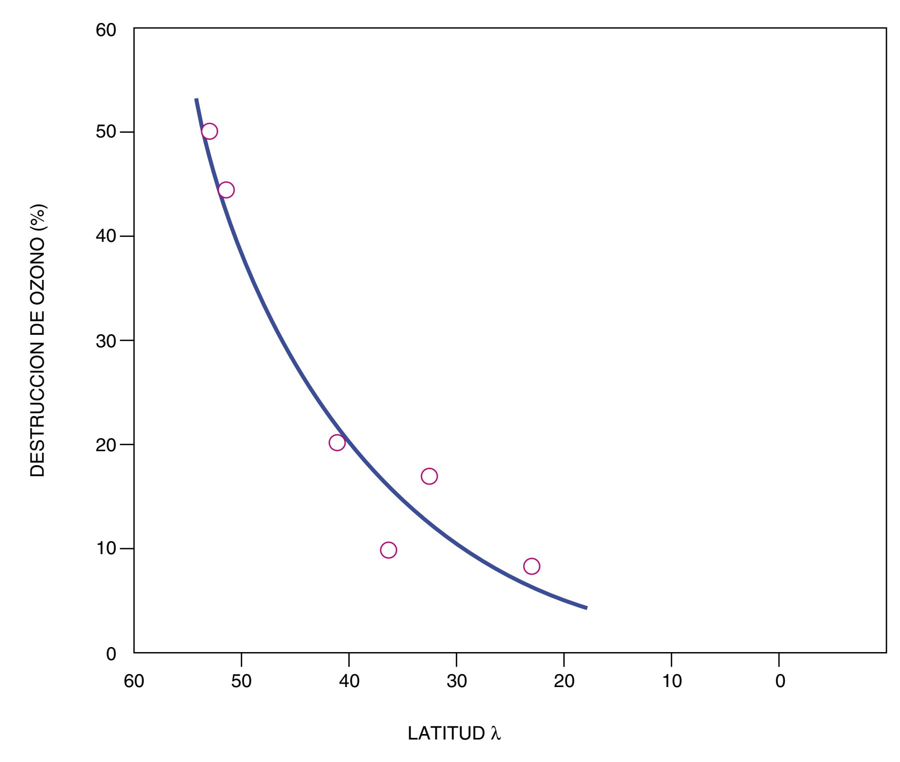
A la vista de estos resultados se volvió a estudiar los mapas de ozono suministrados por el satélite *Meteor-3*. El correspondiente al primero de octubre presentaba la formación de un profundo agujero sobre el continente antártico, en tanto que el sur de Argentina y Chile se hallaba bajo valores altos de la columna de ozono. Los mapas correspondientes al día 14 revelaban una dilución del agujero sobre la Antártida, con la formación de un área extensa sobre la misma de bajo contenido de ozono. Para ese día el mapa mostraba también un área de bajo contenido de ozono cerca de Argentina y Chile. El día 17, que fue cuando se detectó el máximo daño en la capa de ozono en la estación de Río Grande, los mapas indicaban la penetración del área pobre en ozono sobre el sur de Argentina y Chile. El agujero de ozono sobre la Antártida adquiría una forma elipsoidal y aparentaba empezar a girar. Efecto que ya resultaba evidente en los mapas correspondientes a los días 20 y 24, donde se observaba también la retirada, del sur de Argentina y Chile, de las áreas pobres en ozono.

En esa secuencia de los mapas de ozono del mes de octubre conviene detenerse en la situación que presentaba el día 20, para fijarse en que el continente americano parece atraer el agujero de ozono. Ello podría explicar la anómala penetración de masas de aire pobres en ozono en el continente americano. Pero se desconoce la causa real de ese fenómeno.

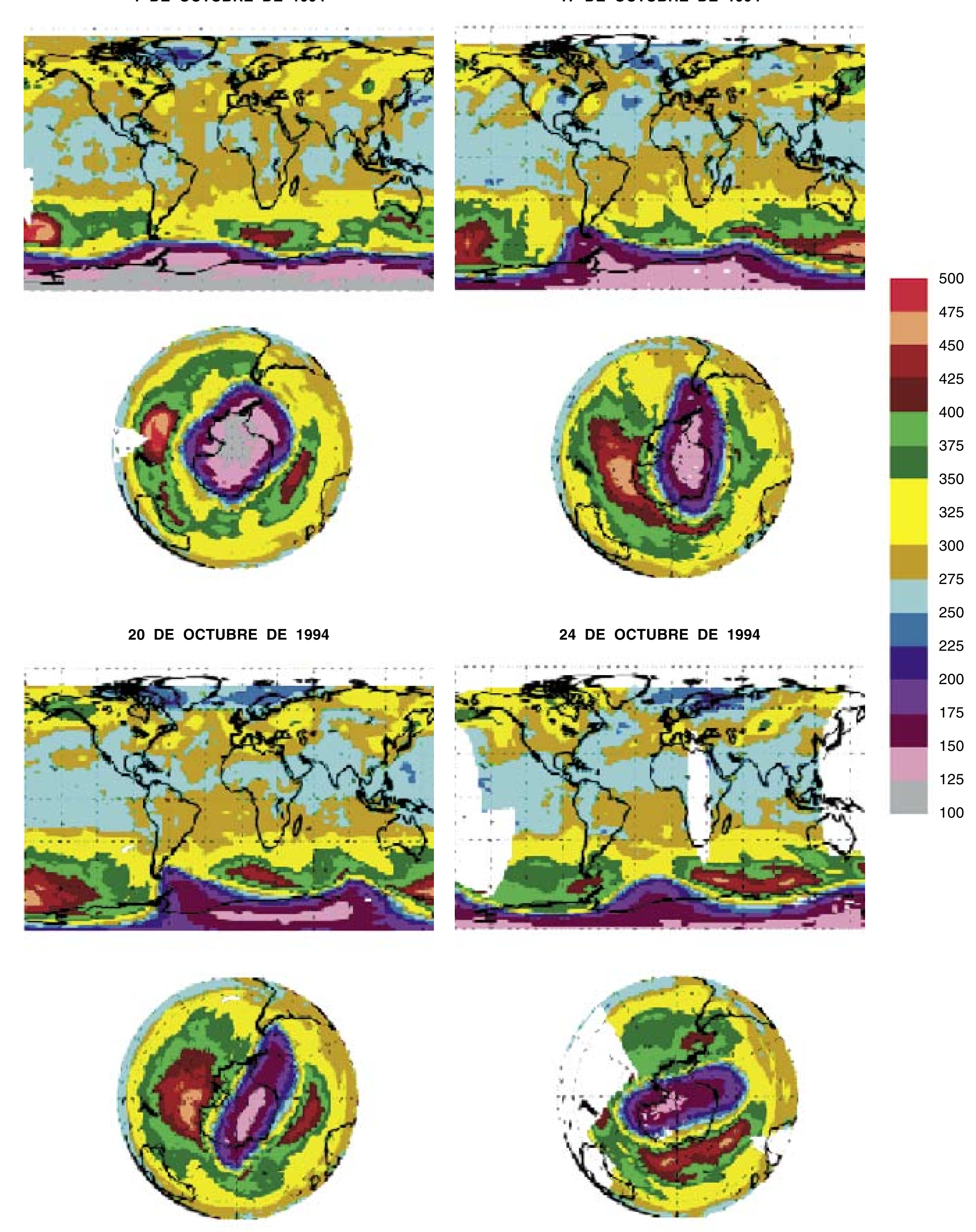
Aunque las malas condiciones atmosféricas que afectaron a Argentina y Chile por debajo del paralelo 50 S impidieron averiguar hasta dónde llegaron los efectos del daño en la capa de ozono, los valores numé-



4. VALORACION DE LA COLUMNA DE OZONO registrada por la estación de Río Grande, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 1993. Los círculos en negro corresponden a los valores suministrados por el satélite *Meteor-3*. Los círculos blancos son los suministrados por el medidor de absorción diferencial. Ambas mediciones ponen de manifiesto el daño en la capa de ozono en el continente sudamericano. A principio de la primavera austral se detectaron diversos descensos en la columna de ozono, siendo los más intensos los observados los días 27 de septiembre (día 270), 23 de octubre (día 296) y 8 de noviembre (día 312). El día 1 corresponde al primero de enero.



5. VARIACION del porcentaje de daño en la capa de ozono en función de la latitud de la estación para el día 27 de septiembre de 1993. Sus valores indican que el daño en la capa de ozono alcanzó latitudes muy bajas, hasta los 23 S. Los valores se midieron en las estaciones argentinas de Río Grande, Bariloche y Tandil, y las chilenas de Punta Arenas, Valparaíso y Antofagasta.



6. MAPAS de la columna de ozono elaborados a partir de los datos suministrados por el satélite *Meteor-3* correspondientes a los días 1, 17, 20 y 24 de octubre de 1994. En la figura se pone de manifiesto la evolución del agujero de ozono.

Medición de la columna de ozono por la técnica de absorción diferencial

La medición del ozono total estratosférico por técnicas de absorción diferencial (AD) se basa en mediciones de la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre a dos longitudes de onda próximas. Estas longitudes de onda se eligen de suerte tal que la atenuación debida al ozono sea muy diferente para ambas. En concreto, se toman $\lambda_{on} = 300$ nanómetros y $\lambda_{off} = 315$ nanómetros, en donde la sección eficaz de absorción del ozono es varias veces superior en λ_{on} comparado con λ_{off}. Además, en esta región del espectro la atenuación de la irradiancia solar debida a otros componentes atmosféricos es muy parecida; por tanto, el cociente entre la irradiancia de una longitud de onda y la irradiancia a otra longitud de onda nos da el valor de la cantidad de ozono total.

Si denominamos I_λ a la irradiancia solar que llega a nivel terrestre para una cierta longitud de onda λ, después de atravesar una longitud L de atmósfera, su valor vendrá dado por la expresión:

$$I_\lambda = I_{o\lambda} \cdot \exp\left(\int_0^L (k_{ab\lambda} + k_{R\lambda} + k_{M\lambda})dr \right)$$

en donde $I_{o\lambda}$ es la irradiancia solar fuera de la atmósfera, $k_{ab\lambda}$ es el coeficiente de extinción debido a absorción de componentes atmosféricos, $k_{R\lambda}$ el coeficiente de extinción debido a dispersión Rayleigh, y $k_{M\lambda}$ el coeficiente de extinción por dispersión Mie. El coeficiente de extinción $k_{ab\lambda}$ incluye la absorción por vapor de agua ($k_{va\lambda}$), ozono ($k_{o\lambda}$) y otros gases ($k_{g\lambda}$) como N_2, O_2, CO_2, etc. En longitudes de onda λ_{on} y λ_{off} los coeficientes para dispersión Rayleigh y Mie son casi iguales: $k_{R\lambda on} = k_{R\lambda off}$, $k_{M\lambda on} = k_{M\lambda off}$, siendo además en esta zona del espectro las absorciones de los componentes atmosféricos, exceptuando el ozono, prácticamente nulas: $k_{va\lambda} \approx 0$, $k_{g\lambda} \approx 0$. La atenuación de la luz solar en esta región espectral se debe, pues, a la absorción de ozono estratosférico, y como además la absorción a $\lambda_{on} = 300$ nm es siete veces superior a la longitud de onda de $\lambda_{off} = 315$ nm, se considerará que $k_{o\lambda on} = 7\ k_{o\lambda off}$. Por tanto el cociente de intensidades a λ_{on} y a λ_{off} vendrá dado por:

$$\frac{I_{\lambda on}}{I_{\lambda off}} = \frac{I_{o\lambda on}}{I_{o\lambda off}} \exp\left(\int_0^L (k_{o\lambda on} \quad k_{o\lambda off})dr \right)$$

Si expresamos el coeficiente de absorción $k_{o\lambda}$ en función de la concentración de ozono N y de su sección eficaz de absorción σ, la expresión anterior toma la forma:

$$\frac{I_{\lambda on}}{I_{\lambda off}} = \frac{I_{o\lambda on}}{I_{o\lambda off}} \exp\left((\sigma_{on} \quad \sigma_{off}) \int_0^L N dr \right)$$

o en función de la masa de aire relativa m_r:

$$\frac{I_{\lambda on}}{I_{\lambda off}} = \frac{I_{o\lambda on}}{I_{o\lambda off}} \exp\left((\sigma_{on} \quad \sigma_{off})\, \bar{N}\bar{D} m_r \right)$$

donde ahora $\bar{D}$ es el espesor medio de la capa de ozono y $\bar{N}$ su concentración media. El factor m_r incluye correcciones por efectos de la hora solar, día del año y latitud. Así pues, una medición de $I_{\lambda on}$ e $I_{\lambda off}$ proporciona un valor de la columna de ozono.

Experimentalmente los medidores dan un valor $M(\lambda) = \beta(\lambda) I(\lambda)$, en donde $\beta(\lambda)$ incluye las eficiencias del sistema de detección para cada longitud de onda. Trabajando a longitudes de onda próximas $\beta(\lambda_{on}) \approx \beta(\lambda_{off})$ de forma que la relación experimental $M(\lambda_{on})/M(\lambda_{off})$ dará una medida directa del cociente de irradiancias $I(\lambda_{on})/I(\lambda_{off})$.

ricos suministrados por el satélite *Meteor-3* indicaron que también en 1994 la dilución del agujero de ozono afectó a latitudes bajas; en Valparaíso se detectaron descensos en la columna de ozono de aproximadamente un 18 % alrededor del día 17 de octubre.

Es de esperar que el cumplimiento de los acuerdos recientes sobre medidas a adoptar sobre la limitación de la producción y uso de CFC que atentan contra la capa de ozono frene el fuerte deterioro observado en la última década. Este retroceso en el deterioro de la columna de ozono sobre la Antártida debe repercutir positivamente en las latitudes bajas, al estar relacionado su daño con la dilución del agujero de ozono antártico. Sin embargo, dadas las especiales características de los CFC, su gran estabilidad y el tiempo que tardan en alcanzar el continente antártico, estas medidas necesarias tardarán años en dar sus frutos y así apreciarse una recuperación de ese manto protector de la radiación ultravioleta.

Por su parte, la investigación sobre el impacto de contaminantes en el deterioro de la capa de ozono debe proseguir empleando los medios que la técnica pone a nuestra disposición, en paralelo con nuevos diseños que por sus características de bajo coste y fácil manejo permitan desarrollar una extensa red de medida. La posibilidad de disponer de un extenso banco de datos es fundamental en el estudio de la evolución futura del agujero de ozono antártico y su influencia en el continente sudamericano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL AGUJERO DE OZONO. R. S. Stolarski, en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1988, pág. 12.

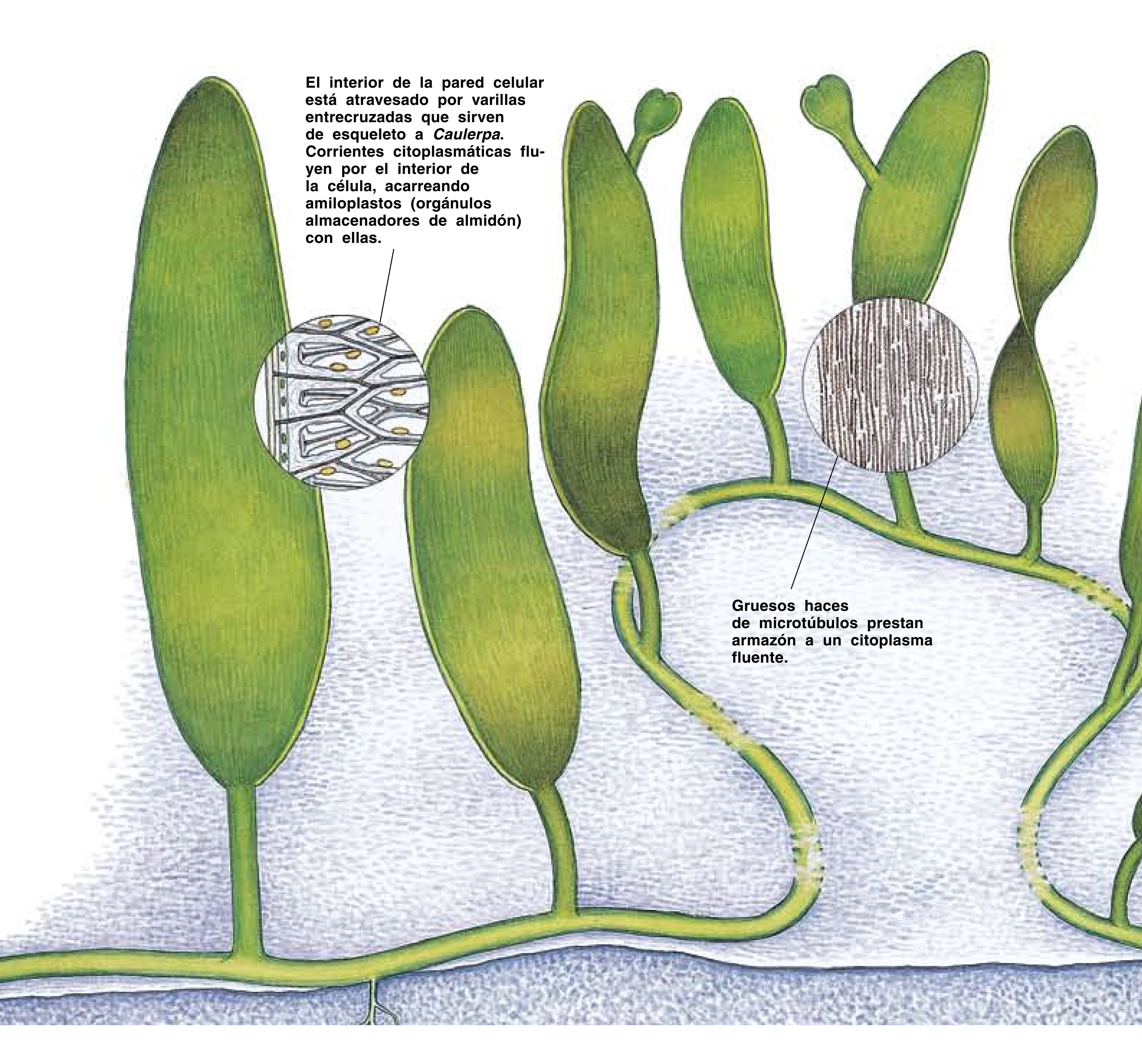
OZONE DEPLETION DURING 1993 SPRING OVER ARGENTINA AND CHILE. J. O. Tocho, F. Cussó, G. Lifante y F. Jaque, en *Optical methods in biomedical and environmental sciences*. Elsevier, Amsterdam, 1994; págs. 325-328.

GROUND-BASED ULTRAVIOLET-RADIATION MEASUREMENTS DURING SPRINGTIME IN THE SOUTHERN HEMISPHERE. F. Jaque y col., en *Europhysics Letters*, vol. 4, n.º 289, 1994.

Caulerpa

Caulerpa es un organismo unicelular. Pese a ello esta alga tropical consta de una compleja estructura de filoides, cauloides y rizoides

William P. Jacobs



Quien provisto de gafas de buceo y calzado con aletas se haya sumergido en los fondos donde medra *Caulerpa*, no habrá advertido nada extraño en esta planta verde que emerge de las arenas coralinas. Se parece mucho a las fanerógamas que pueblan las aguas calientes y someras de los mares. Por su fronde en forma de hoja y por su cauloide horizontal y ramificado, *Caulerpa* recuerda ciertas plantas superiores, en particular los helechos o las freseras. Pero el examen interno revela la singular estructura del alga. *Caulerpa* es el mayor de los organismos unicelulares; también es el más diferenciado. Ninguna pared o membrana celular separa un núcleo de otro ni de su citoplasma adyacente.

Este organismo singular sigue siendo un desconocido para la mayoría de los biólogos, a pesar de que se describió ya hace casi 150 años. Su existencia real constituye un reto para la ciencia. Ninguna otra célula es capaz de crecer hasta una longitud de sesenta o cien centímetros, y mucho menos de diferenciarse en diversos órganos (rizoides, cauloides y filoides). Las cuestiones suscitadas por la peculiar estructura de *Caulerpa* han desconcertado a los contados biólogos que han investigado su desarrollo.

Todos los demás organismos de parejo tamaño y complejidad constan de centenares de miles de células microscópicas. En cada una de estas células, hallamos una membrana que encierra un volumen limitado de citoplasma y un núcleo. La mayoría de las plantas secretan también una pared celular fuera de la membrana. Tan extendida se halla esta organización, que entre 1838 y 1839 Matthias Schleiden, de la Universidad de Jena, y Theodor Schwann, de la Universidad de Lovaina, dieron forma a sus observaciones en una “teoría celular”. Establecieron que la célula constituía la unidad básica de estructura y función en vegetales y animales. De entonces acá, miles de observaciones han convertido la teoría celular en cuerpo doctrinal amplio y aceptado en el que se asientan las ideas actuales sobre el desarrollo biológico. Estas ideas atribuyen el tamaño microscópico de la mayoría de las células a la limitada área de influencia del núcleo sobre el citoplasma circundante.

¿Cómo puede *Caulerpa* conseguir su tamaño macroscópico y su complejidad sin la compartimentación que otros organismos parecen necesitar? ¿Está limitada por su forma unicelular? ¿Coordinan las hormonas acaso su desarrollo y regeneración, igual que sucede en las plantas superiores? En la hipótesis de que sea así, ¿emplea *Caulerpa* los mismos mensajeros químicos que estas plantas? ¿Cómo evita que el citoplasma fluya hacia el océano cuando su única pared celular la desgarran las olas o las hordas de animales hambrientos? He dedicado los últimos 40 años a buscarle respuesta a estas preguntas.

Comencé a interesarme por *Caulerpa* a principios de los cincuenta. Le oí hablar de ella a William “Cappy” Weston, un carismático profesor de la Universidad de Harvard. Cuando revisé la bibliografía para conocer mejor el tema, encontré una confusión exasperante. A lo largo del siglo pasado habían aparecido publicaciones muy superficiales, fruto de breves visitas en períodos de vacaciones a la Estación Zoológica de Nápoles. Recogían las observaciones, a menudo contradictorias y de imposible resolución, de tales incursiones episódicas. Algunos factores podrían explicar los frecuentes resultados contrapuestos. Los cambios estacionales de primavera a otoño y unas inadecuadas (y casi siempre desconocidas) superficies de muestreo condicionaban los datos. Los investigadores rara vez repetían los experimentos y, por supuesto, muchos trabajaron antes de la época de los análisis estadísticos; dejaron, pues, al lector que adivinara la verdad de las diferencias aportadas.

Sólo después de que dos biólogos europeos decidieran investigar *Caulerpa* durante períodos prolongados pudo empezar a confiarse en los resultados publicados. J. M. Janse, de la Universidad de Leiden, hizo algunas visitas estivales a Nápoles entre 1886 y 1909. Más tarde, en los años veinte, Rudolph Dostál, de la Universidad de Brno, llevó el alga a un acuario de agua de mar de su laboratorio para poder estudiarla con mayor detenimiento. En un artículo de 1945 resumió sus 20 años de investigación en la regeneración de trozos de *Caulerpa*. Diez años más tarde comencé mis investigaciones en *Caulerpa*, empezando por una estancia de seis meses en Nápoles. Siguiendo el ejemplo de Dostál, traje el alga a casa y la cultivé en mi laboratorio de la Universidad de Princeton.

WILLIAM P. JACOBS ha investigado el transporte de las hormonas vegetales y su función en el control de la diferenciación, regeneración, crecimiento y longevidad de las plantas. En 1948 entró en el claustro docente de la Universidad de Princeton, de donde es actualmente catedrático emérito.

1. El FONDO DEL MAR es el hogar donde habita *Caulerpa prolifera*, un alga unicelular que alcanza casi un metro de longitud. La célula, provista de múltiples núcleos, carece de paredes internas. Hay más de 70 especies de *Caulerpa* distribuidas en las aguas cálidas y poco profundas de todo el mundo, desde las costas de Italia hasta los Cayos de Florida.

Trabajando con mis colaboradores cuantifiqué el desarrollo de *Caulerpa prolifera*. Uno de nuestros primeros descubrimientos fue que la tasa de crecimiento del alga era comparable a la de los organismos pluricelulares. Con James C. W. Chen, que estaba entonces en Princeton, saqué fotografías diarias para medir su crecimiento. Observamos que el cauloide cilíndrico de la planta crecía aproximadamente 4,6 mm por día, valor muy parecido al apreciado en tallos de diversas plantas pluricelulares.

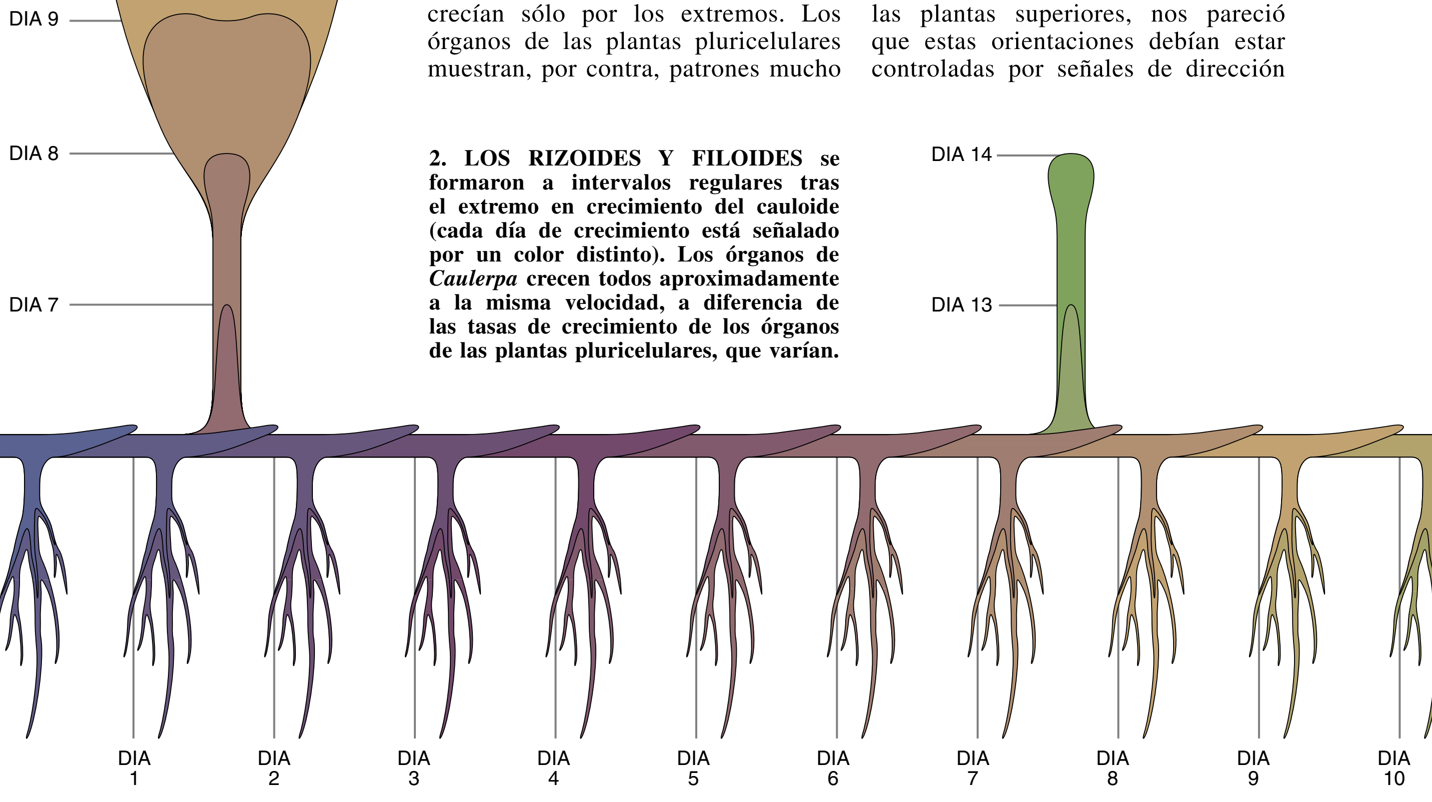
El patrón de desarrollo de *Caulerpa* difería, sin embargo, del crecimiento más complejo observado en plantas superiores. La mayoría de los órganos de las plantas pluricelulares maduran a un ritmo que varía con el tiempo, pero el cauloide de *Caulerpa* crecía a velocidad constante. En plantas pluricelulares, ciertas células que contienen varios núcleos (como la macrocélula de *Caulerpa*) mostraban también idéntico comportamiento. Por consiguiente, los períodos largos de crecimiento constante podrían ser característicos de células dotadas de muchos núcleos, estructura que *Caulerpa* comparte con determinadas células de plantas superiores.

Nos sorprendió encontrar que los ritmos de elongación de los tres órganos de *Caulerpa* —cauloide, rizoide y filoide— no diferían significativamente entre sí. En las plantas superiores, la velocidad de crecimiento varía de un órgano a otro (tallo, raíz y hoja). Nuestros resultados con *Caulerpa* mostraban que, fuese cual fuese el factor que limitaba el crecimiento del cauloide, debía afectar también al resto de la planta, condicionando el crecimiento de los otros dos órganos.

La localización del crecimiento de los cauloides de *Caulerpa* difería también de los patrones habituales de plantas superiores. Nosotros demostramos que cauloides y rizoides de *Caulerpa* crecían sólo por los extremos. Los órganos de las plantas pluricelulares muestran, por contra, patrones mucho más complejos y raramente limitan la elongación al ápice del talo.

Con mis discípulos, me apresté a conocer las primeras fases del desarrollo de rizoides y filoides. Nos vimos recompensados. Los rizoides, regularmente situados, resultaban de la iniciación diaria de un nuevo grupo en la parte inferior del cauloide y cerca del extremo. Los filoides se desarrollaban en la parte superior del cauloide, un poco alejados del extremo, y eran menos frecuentes y menos regulares que los rizoides. En mi cultivo de muestras de *C. prolifera*, recolectada en los Cayos de Florida, se formaba un nuevo filoide cada 5 o 6 días. El fronde parecía primero el ápice cilíndrico de un nuevo rizoide o cauloide, pero la punta desarrollaba seguidamente una lámina aplanada y en corazón que, al crecer, adquiría una forma bastante rectangular y alcanzaba de diez a doce centímetros de longitud. A menudo, un nuevo filoide comenzaba su crecimiento cerca del extremo del primario, cuando éste había ya madurado. De hecho, el nombre específico *prolifera* deriva del desarrollo —o proliferación— de nuevos filoides en las puntas de los viejos filoides.

Los filoides de *Caulerpa* nacían en la parte superior del cauloide y crecían en dirección a la luz del sol. Los rizoides se desarrollaban en la parte inferior del cauloide y crecían hacia el substrato. Por analogía con las plantas superiores, nos pareció que estas orientaciones debían estar controladas por señales de dirección

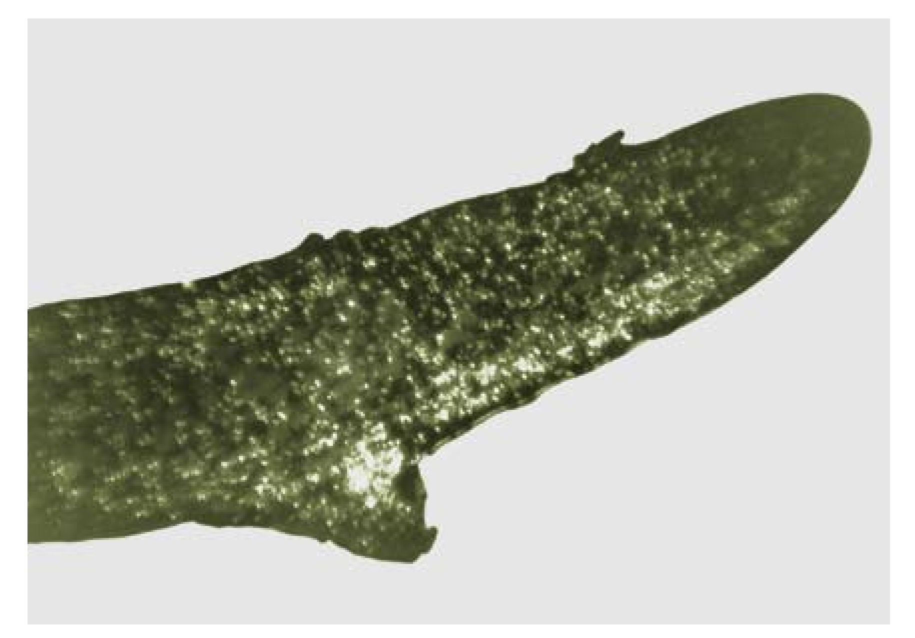


2. LOS RIZOIDES Y FILOIDES se formaron a intervalos regulares tras el extremo en crecimiento del cauloide (cada día de crecimiento está señalado por un color distinto). Los órganos de *Caulerpa* crecen todos aproximadamente a la misma velocidad, a diferencia de las tasas de crecimiento de los órganos de las plantas pluricelulares, que varían.

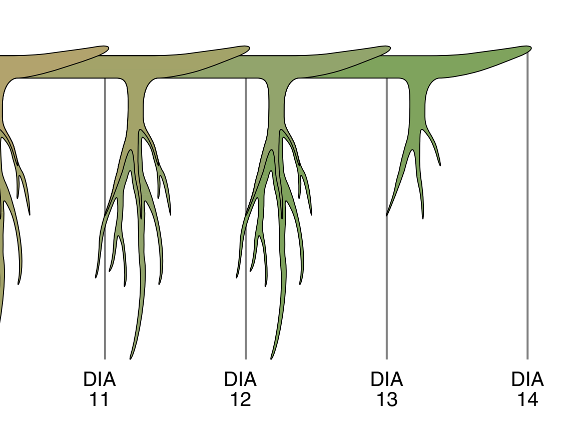
procedentes de la luz o la gravedad, o de ambas. En consecuencia, decidimos ver si la gravedad se bastaba por sí sola para controlar el lugar donde salían los filoides y los rizoides.

Pusimos boca abajo nuestras plantas de *Caulerpa*, rotando cada planta 180 grados sobre su eje horizontal. Al día siguiente, un nuevo rizoide se había desarrollado en la, ahora, parte inferior del cauloide. Se formó sin la menor demora con respecto a los rizoides que crecían en las plantas erguidas. El nuevo filoide emergió a la misma distancia que los otros, aunque en la nueva parte superior. Esta secuencia de acontecimientos persistía, viniera la iluminación de los dos lados de la planta o sólo desde arriba, como ocurre en la naturaleza.

Estamos hablando del efecto más rápido que se conoce de alteración de la localización del desarrollo de un órgano. Por lo que parece, el proceso lo desencadenó una acumulación local de amiloplastos, estructuras almacenadoras de almidón en el interior celular. Junto a Michael B. Matilsky observamos que, a las seis horas de inversión del alga, había un 54 % más de amiloplastos en la nueva parte inferior del extremo del cauloide que antes. También vimos que estos orgánulos se acumulaban donde el nuevo grupo de rizoides crecería después. En la parte superior del extremo del cauloide disminuía, en correspondencia, el número de amiloplastos. A tenor de lo percibido, los amiloplastos descendían citoplasma abajo y se asentaban en la base del cauloide. En las partes alejadas de la punta, en las zonas donde no se desarrollan rizoides, no se observó redistribución alguna de los orgánulos después de la inversión. Nuestros resultados indicaban que *Caulerpa* usaba los amiloplastos en respuesta a la gravedad, cual si se tratara de plantas superiores. Con todo, dicha respuesta a la gravedad resultaba un tanto particular. En vez de limitarse a cambiar la dirección del crecimiento, la gravedad iniciaba el desarrollo de órganos en partes nuevas de *Caulerpa*.



3. El BROTE EN CRECIMIENTO (mostrado aquí en forma de fina sección iluminada con luz polarizada) se orienta por medio de los amiloplastos. Estas estructuras almacenadoras de almidón (*puntos brillantes*) se acumulan en la parte inferior del brote de acuerdo con la gravedad; los grupos de rizoides se forman en respuesta a la acumulación.



Cualquier estudio de laboratorio del alga requería de entrada sacarla de su medio natural en el mar. ¿Cómo lograba pervivir una planta unicelular tras la agresión de los herbívoros o de biólogos sádicos como yo? En cuanto se mordisquea o rasga un filoide o un cauloide, parte del citoplasma fluye al mar, como cabía esperar. Pero en seguida se crea una placa en la herida y se forma tras ella una nueva pared. Semejante autosellado permite a *Caulerpa* sobrevivir a pérdidas importantes de superficie de filoide y recomenzar el proceso de regeneración. No constituye ninguna rareza la regeneración de una planta entera de *Caulerpa* a partir de un trozo de filoide o cauloide.

En el mar aparecen a menudo fragmentos de *Caulerpa* en fase de regeneración. Durante muchos años, los biólogos consideraron la regeneración la única vía de reproducción del alga. No llegaron pruebas de otros tipos hasta las postrimerías de los años veinte, cuando Dostál observó que los filoides viejos formaban unas minúsculas proyecciones a partir de las cuales fluía el citoplasma. A lo largo de éste, la planta soltaba células flageladas móviles. A finales de los años treinta se observó la reproducción sexual —la fusión de un par de estas células— en distintas especies de *Caulerpa*. Ello no empece que la rotura y la consiguiente regeneración sean la vía más probable de reproducción de *Caulerpa* en la naturaleza.

Una versión experimental de una placa producida en una herida nos permite ahondar en los mecanismos de la regeneración de *Caulerpa*. En 1904, Janse descubrió que, presionando al mismo tiempo las paredes opuestas de la célula y juntándolas, en pocos días crecía una nueva pared celular: la pared de presión. Por mi parte hallé que esta respuesta protectora cursa más deprisa, en cuestión de minutos. Podemos, pues, cortar el alga por las paredes de presión, perdiendo poco citoplasma, y observar la regeneración de fragmentos de *Caulerpa*. Si así no fuera, tales trozos no podrían regenerarse, pues no habría suficiente citoplasma para reorganizar el material celular y estimular el desarrollo.

La regeneración de la planta entera a partir de grandes trozos ocurre de forma natural. Los estudios de laboratorio indicaron, además, una inesperada direccionalidad del proceso. Cuando cortábamos una pieza de 50 milímetros de largo de un filoide de *Caulerpa*, se generaba una nueva planta en una secuencia polar muy determinada. Primero, se desarrollaban los rizoides en el corte hecho cerca del cauloide; luego, crecía un nuevo cauloide a sólo unos milímetros del corte. En la parte superior de la sección del filoide comenzó a generarse

un nuevo filoide. La mayoría de los organismos poseen esta polaridad, lo mismo en el desarrollo normal que en la regeneración (si son capaces de realizarla). Pero en plantas pluricelulares esta regeneración se atribuye al movimiento polar de substancias de crecimiento a través de miles de células. La demostración de un rasgo similar en la *Caulerpa* unicelular sorprendió a muchos.

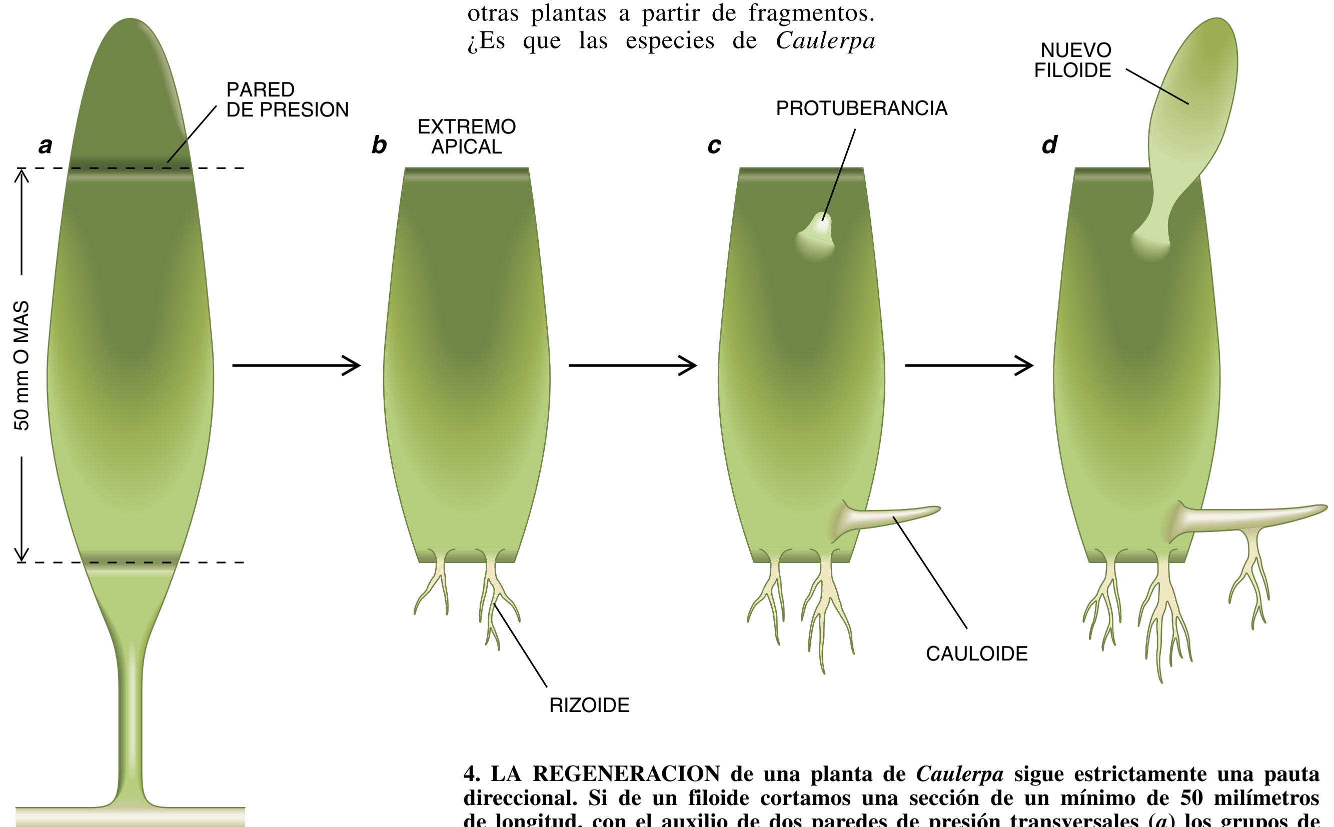
Nos servimos también de las paredes de presión para alterar los mecanismos de desarrollo de los trozos de *Caulerpa*. Una pared de presión transversal hecha justo debajo del lugar de crecimiento de un filoide puso el brote, fisiológicamente hablando, encima de la base de la sección. Como el renuevo se situaba cerca de la parte inferior de su cauloide, el pequeño vástago que debía crecer y convertirse en filoide se convertía en rizoide. Parejamente, un brote que comenzó siendo rizoide pasaba a ser filoide.

Visto el sorprendente efecto de la gravedad sobre el desarrollo del extremo del cauloide, investigamos si incidía acaso en la regeneración. Como los filoides contienen también los amiloplastos almacenadores de almidón, quizá su puesta a punto inducida por la gravedad podría alterar la pauta de regeneración. Pero ni la pauta ni el número de órganos regenerados variaron al invertir los trozos de filoide. Los rizoides se regeneraban sólo al final del cauloide original, independientemente de que este extremo estuviese en la parte superior o en la inferior en relación a la gravedad.

No sabemos a ciencia cierta qué determina la direccionalidad de la regeneración de trozos de *Caulerpa*. Todo indica que podría ser la sorprendente corriente citoplasmática. En los filoides se observan, incluso bajo los pocos aumentos de un microscopio de disección, ciertos flujos de movimiento de material celular. Anchos canales corren paralelos al eje longitudinal del filoide; el flujo puede seguir una dirección opuesta en ramales adyacentes. Esas corrientes podrían trasladar substancias organogénicas en una dirección determinada, haciendo, pues, las veces de los millares de células transportadoras, y orientadas, de las plantas superiores.

Si dejáramos de lado que estos fragmentos regeneradores son sólo trozos multinucleados de una sola célula, la regeneración polar de *Caulerpa* remedaría la familiar regeneración de otras plantas a partir de fragmentos. ¿Es que las especies de *Caulerpa* —y por extensión otras algas— se apoyan en las hormonas para coordinar el desarrollo y la regeneración? En tal caso, ¿guardan sus hormonas parentesco químico con las que presumiblemente usan las plantas más evolucionadas?

El ácido indol-3-acético (IAA) es una hormona que interviene en el control de la regeneración de las plantas pluricelulares. Mediante las técnicas de cromatografía de gases y espectrometría de masas, hemos demostrado, sin margen para la ambigüedad, que el IAA está presente en *Caulerpa*. Los trabajos precursores de Ned Kefford y Arun Mishra, de la Universidad de Hawai, Clinton J. Dawes, de la Universidad del Sur de Florida, y Henry Augier, de la Universidad de Aix-Marseille II, habían puesto de manifiesto que la adición de IAA en agua de mar donde crecía *Caulerpa* estimulaba su desarrollo. Comprobada la presencia y acción del IAA en *Caulerpa*, quedaba por averiguar si la acción de IAA dependía de una distribución selectiva de la hormona, a imagen de lo que sucede en las plantas pluricelulares. No existía indicio alguno de la formación de bolsas con IAA en *Caulerpa*. Por el contrario, si se añadía IAA marcado con carbono



4. LA REGENERACION de una planta de *Caulerpa* sigue estrictamente una pauta direccional. Si de un filoide cortamos una sección de un mínimo de 50 milímetros de longitud, con el auxilio de dos paredes de presión transversales (*a*) los grupos de rizoides crecerán en el extremo que anteriormente estaba más cercano al cauloide (*b*). Brotarán un nuevo cauloide encima mismo de la parte inferior del segmento (*c*) y un nuevo filoide en el extremo superior. Alcanzado cierto desarrollo del cauloide, de éste nacerán nuevos grupos de rizoides y filoides.

radiactivo a los ápices de los filoides de *Caulerpa*, la radiactividad, y presumiblemente el IAA, se extendía de manera uniforme por el cauloide.

Las giberelinas, otra clase de hormonas del desarrollo, operan en numerosas plantas pluricelulares. Según trabajos que nos precedieron, los extractos de *Caulerpa*, añadidos a plantas superiores, estimulaban los patrones de crecimiento cual si se tratara de giberelinas. Pero mi trabajo posterior, de análisis más exhaustivo mediante espectrometría de masas, reveló que no había giberelinas ni metabolitos de giberelinas conocidos en los extractos de *Caulerpa*. ¿Acaso estaba causada la actividad giberelínica de *Caulerpa* por alguna molécula química que no tenía la estructura básica de la giberelina pero sí ejercía una actividad similar? ¿O se trataba de otra giberelina, todavía desconocida, que habría que añadir al larguísimo elenco de las setenta y pico identificadas?

Sospechamos que este tipo de hormonas producen sus efectos en *Caulerpa* a través de la interacción con substancias u orgánulos de distribución variable. Por ejemplo, los amiloplastos que se acumulan en la parte inferior del extremo de crecimiento del cauloide podrían promover la formación de rizoides trabajando en colaboración con el IAA o la substancia de acción giberelínica. La interacción presta su respaldo al crecimiento dirigido por la gravedad e inicia el desarrollo de rizoides en sitios específicos.

Aunque queda mucho por saber sobre múltiples interacciones hormonales de *Caulerpa*, sí se conoce la mayoría de los orgánulos, similares por lo demás a los de las plantas superiores. En el citoplasma periférico, los cloroplastos (que intervienen en la fotosíntesis) y muchos pequeños núcleos se alinean con los amiloplastos almacenadores de almidón. Un gran saco citoplasmático, o vacuola, se asienta en el centro de la célula.

Los únicos entes perceptiblemente insólitos son unas varillas, muy numerosas, que se proyectan hacia el interior desde la pared celular que rodea la planta. Las varillas corren paralelas y perpendiculares al eje longitudinal de los órganos, formando una red densa e interconectada. Janse contó 850 varillas por milímetro cuadrado en la parte vieja del filoide y cinco veces más en la punta. Las varillas están enfundadas en citoplasma; su densidad en el organismo se compensa parcialmente con la falta de superficie de membrana celular. Sirven de esqueleto de soporte para la célula gigante. Algunos investigadores les atribuyen también una función vehicular hacia y desde el entorno marino.



5. *CAULERPA* MEXICANA presenta los filoides profundamente divididos. Los rizoides se adhieren a los fragmentos de coral o a las rocas del fondo de las lagunas coralinas. La distribución mundial de las especies de *Caulerpa* (cada una con su morfología distintiva) confirma que una estructura unicelular no es impedimento para una exitosa competencia con las plantas superiores.

En mi laboratorio de Princeton, Dinkar D. Sabnis descubrió a través del microscopio electrónico una distribución de no menor rareza por lo que concierne a los microtúbulos. Dedujimos que, en la capa interna de citoplasma del alga, donde ocurre el flujo, había láminas o haces gruesos de microtúbulos, espaciados de forma regular y orientados de modo uniforme. Nuestra sospecha de que los microtúbulos guardaban alguna relación con el flujo fue confirmada posteriormente por otros investigadores. Inoculando la planta con el alcaloide colquicina, los microtúbulos se separaban (como era de esperar tras lo observado en diversas especies pluricelulares) y se detenía el flujo.

Muchos de los misterios que rodean la propia existencia de *Caulerpa* se han disipado ya. Pese a tan singular organización unicelular, el alga compite con éxito con los organismos pluricelulares que habitan en los mares cálidos. Crece con la celeridad de muchos de sus alejados parientes pluricelulares de tierra firme. *Caulerpa* ha tenido un éxito tal, que incluso alguna de sus especies se explota comercialmente en Filipinas, para su uso en ensaladas. Se regeneran directamente individuos nuevos a partir de trozos de cauloide o filoide, y a una escala temporal y espacial parecida a la observada en las plantas pluricelulares más evolucionadas. La propia existencia de 73 especies de *Caulerpa* en todo el mundo, y su presencia habitual en la flora de las aguas tropicales, da a entender que su estructura unicelular no supone mayor desventaja.

Si *Caulerpa* es esa célula tan gigante cuan diferenciada, dotada de núcleos múltiples, ¿dónde yace el límite longitudinal que tamaña estructura puede alcanzar? No veo nada que pueda impedir la existencia en el mar de un organismo unicelular aún mayor. Allí, la fuerza de Arquímedes sustituye el soporte interno que las paredes celulares ofrecen a las plantas terrestres.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARE ANGIOSPERM HORMONES PRESENT IN, AND USED AS HORMONES BY, ALGAE? William P. Jacobs en *Plant Growth Substances*, 1985. Dirigido por Martin Bopp. Springer-Verlag, 1986.

HOW DO GIANT PLANT CELLS COPE WITH INJURY? THE WOUND RESPONSE IN SIPHONOUS GREEN ALGAE. Diedrik Menzel en *Protoplasma*, volumen 144, n.º 2-3, páginas 73-91; 1 de julio de 1988.

THE RELATIONSHIP OF CELL AND ORGANISM IN VASCULAR PLANTS. Donald R. Kaplan y Wolfgang Hagemann en *Bioscience*, vol 41, n.º 10, páginas 693-703; noviembre 1991.

Ciencia y empresa

Cubits

Ordenadores cuánticos con iones atrapados

Desde hace tiempo sabemos que un “ordenador cuántico” puede realizar algunas operaciones matemáticas con mucha mayor rapidez que los ordenadores disponibles (*véase* “Computación mecánico-cuántica”, por Seth Lloyd, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1995). Pero nadie sabía cómo construir uno.

El principal rasgo distintivo del ordenador cuántico estriba en el uso del “paralelismo cuántico”, que permite realizar una misma operación sobre varias entradas (“inputs”) a la vez. Para poder aplicar esta propiedad tan sorprendente de la mecánica cuántica es necesario que el ordenador se encuentre completamente aislado, ya que la más mínima perturbación arruinaría el resultado.

Además, un ordenador cuántico debe estar constituido por cubits (o bits cuánticos), que son sistemas con dos estados cuánticos distintos: 0 y 1. La dificultad para construir ese ingenio radica, pues, en encontrar un sistema formado por pequeñas entidades (cubits) que admitan una manipulación fácil y se hallen completamente aisladas del exterior. En el invierno de 1994, P. Zoller, de la Universidad de Innsbruck, y el autor encontraron un sistema que cumple todos los requisitos para construir un ordenador cuántico. Los experimentos realizados en la primavera de 1995 por el grupo de D. Wineland, del Instituto nacional de Pesos y Medidas de Estados Unidos, han confirmado nuestras ideas, y ya hay varios grupos experimentales empeñados en construir ordenadores cuánticos siguiendo nuestra propuesta.

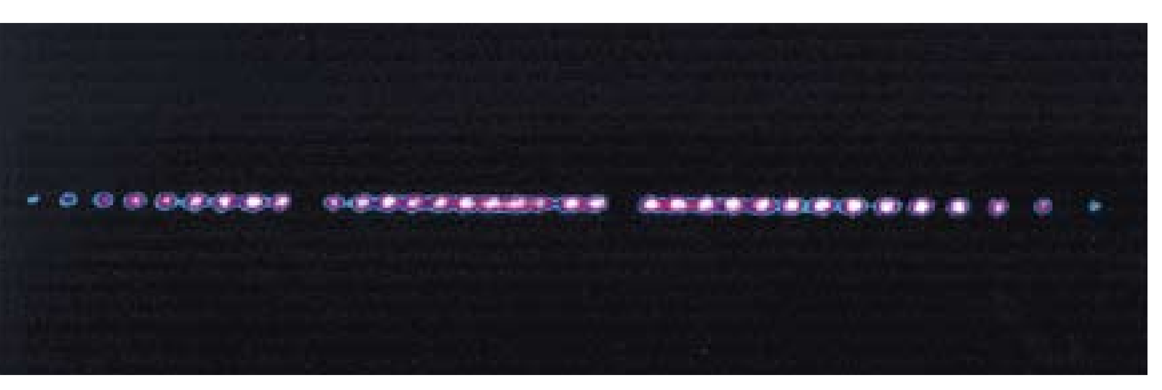
De acuerdo con nuestro planteamiento, un ordenador cuántico estaría constituido por un conjunto de iones atrapados en una trampa lineal (*véase fotografía*). Cada uno de los iones (puntos brillantes en la fotografía) almacena un cubit de información. Los valores 0 y 1 se corresponden con dos órbitas distintas de uno de los electrones del ion correspondiente. Las operaciones lógicas entre distintos cubits se realizan enfocando luz láser sobre los iones correspondientes, lo que hace que cambien su órbita. Para leer el resultado se iluminan con luz de una determinada frecuencia todos los iones a la vez. Según la órbita en que se encuentren, éstos emitirán luz o no, lo que permite conocer el valor del correspondiente cubit. Así, por ejemplo, en la fotografía hay puntos brillantes y oscuros. Los brillantes corresponden a cubits en estado 1; los obscuros representan ceros. Se pueden ya confinar alrededor de 50 iones en una de estas trampas. El conjunto se cierra en un recipiente aislado para evitar la entrada de campos eléctricos o magnéticos incontrolados. Además, se hace el vacío para suprimir los choques entre iones y otros átomos sueltos.

Hay un punto clave en los ordenadores cuánticos: los cubits tienen que poder comunicarse a la hora de crear puertas lógicas, análogas a las utilizadas en los ordenadores habituales.

Consideremos, por ejemplo, la versión cuántica de la operación XOR. Se trata de una operación lógica entre dos cubits en la que el primero no cambia; el segundo cubit pasa al estado 0, si ambos se encontraban inicialmente en el mismo estado (esto es, 00 o 11) o al estado 1 si estaban en distinto estado (10 o 01). Para realizar esta operación es necesario que el primer cubit le “diga” al segundo en qué estado se encuentra; ha de existir, pues, un medio de comunicación (o cable cuántico) entre los cubits. En el caso de los iones, la comunicación entre ellos se realiza a través del movimiento.

Para entender el proceso, imaginémonos los iones a la manera de una cadena de átomos, donde cada uno se une a sus vecinos por un muelle (que impide el acercamiento) y donde los átomos de los extremos permanecen unidos por sendos muelles a paredes fijas (la trampa). Supongamos que, en la situación inicial, los átomos se encuentran parados. Si movemos ligeramente uno de ellos, éste empujará al siguiente a través del muelle, que a su vez empujará al siguiente, y así hasta el último átomo que, tras rebotar en la pared, empujará al anterior, etc. Los átomos se pondrán a oscilar conjuntamente. La configuración del movimiento dependerá de cómo movamos el primer átomo.

El símil de la cadena nos facilita la comprensión de la comunicación entre los iones. Consideremos que los iones están parados de entrada. Iluminamos uno de los iones con un rayo láser. Si el ion cambia de estado, los iones empezarán a moverse. Esto se debe a que cada vez que un ion absorbe o emite un fotón (para cambiar la órbita de su electrón) existe un cambio en su movimiento que se transmite a los demás a través de los muelles. Ocurre lo mismo cuando un cazador dispara su escopeta: por un lado se expulsa la bala (en nuestro caso el fotón) y por otro lado se produce un retroceso que empuja al cazador hacia atrás. Así, dependiendo de que el ion iluminado absorba o



Ordenadores cuánticos con iones atrapados

emita la luz (y, por tanto, de su estado), se produce un tipo de movimiento. Pero ocurre también lo contrario: dependiendo de cómo sea el movimiento, otro de los iones absorberá luz (o no) si lo iluminamos. En resumen, según el estado en que se halle el primer ion, el segundo se comportará de una forma u otra al enfocarle un láser.

Cabe, pues, esperar que en un futuro próximo tengamos ordenadores cuánticos con unas decenas o centenas de iones. Para poder vencer en rapidez a los ordenadores actuales necesitaríamos más de mil iones. No sería lógico, sin embargo, esperar que la primera generación de ordenadores cuánticos sea ni siquiera comparable a los ordenadores de hoy, que se han ido refinando año tras año en sucesivas generaciones desde hace medio siglo. En cualquier caso, el vertiginoso desarrollo de la óptica cuántica y de la técnica asociada pudiera acelerar la sustitución de ciertos prototipos en uso por ordenadores cuánticos.

J. Ignacio Cirac
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Castilla-La Mancha

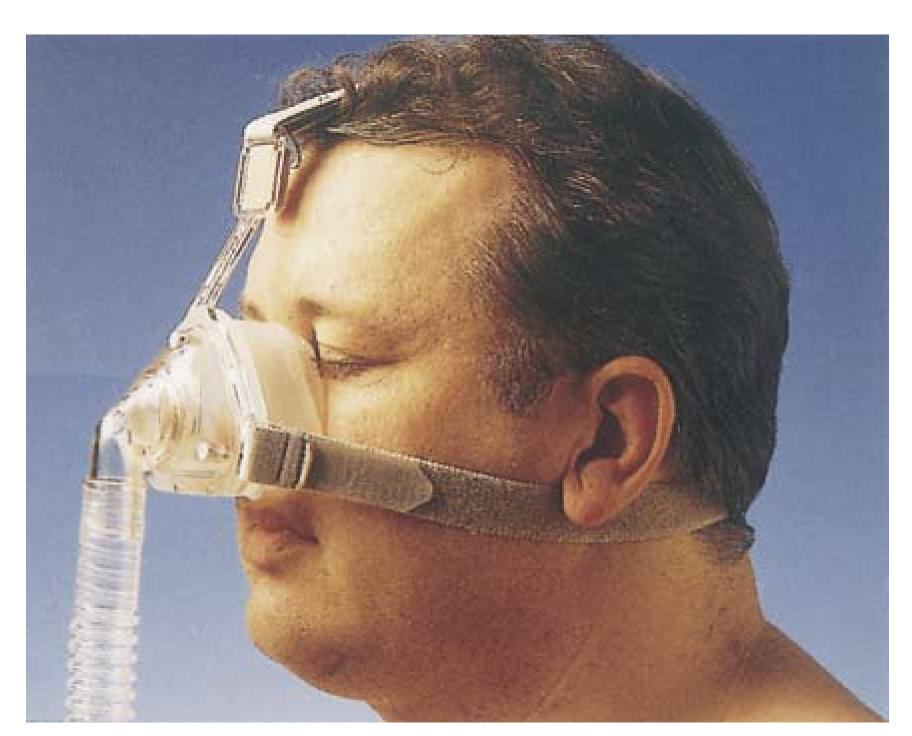
Complicaciones del sueño

Síndrome de apnea

Pasamos un tercio de la vida durmiendo. Pese a ello no puede decirse que se conozca bien la naturaleza, función y episodios que ocurren durante el sueño. Lejos de ser un proceso pasivo, en el sueño se suceden de un modo cíclico estadios caracterizados por patrones neurofisiológicos definidos que reciben la denominación prosaica de estadios 1, 2, 3 y 4 y fase REM (movimiento rápido ocular o sacádico).

En una persona sana, el sueño se inicia con el estadio 1, que dura varios minutos. Siguen los estadios 2, 3 y 4. Reaparecen luego los estadios 1-2 y, finalmente, a los 60-90 minutos, la fase REM.

A lo largo del sueño cambian ciertas variables y constantes biológicas. En la fase REM, se observa una gran actividad cerebral, que se refleja en las ondas rápidas del encefalograma, y la parálisis de todos los músculos del organismo, excepto los del diafragma y los músculos oculares. En esta fase también se producen cambios importantes: inadecuado control de la temperatura corporal y disminución de las respuestas ventilatorias a la hipoxia e hipercapnia. Fuera de la fase REM se mantiene una relativa tranquilidad cerebral y corporal. Para que el sueño sea reparador, las fases descritas han de repetirse cíclicamente. Cualquier anomalía o proceso que altere las fases del sueño o que las fragmente origina un sueño no reparador, responsable de signos y síntomas de diverso significado.



Presión nasal de aire asistida y continua

Entre las causas habituales que fragmentan el sueño e impiden que éste cumpla su función reparadora se encuentra la apnea. Por apnea durante el sueño se entiende el cese del flujo aéreo en boca, nariz o en ambas por de más de 10 segundos; si sólo se trata de una dismunición hablamos de hipopnea. En ambos casos se produce una reducción del oxígeno en sangre o un despertar transitorio ("sueño fragmentado"), lo que provoca consecuencias patológicas: somnolencia y trastornos neuropsiquiátricos (falta concentración, perdida agilidad mental); se producen también consecuencias cardiorrespiratorias derivadas de la propia apnea y de la reducción del oxígeno en sangre (hipertensión arterial, sobrecarga cardiovascular).

La aparición de apneas e hipopneas viene desencadenada por defectos funcionales y anatómicos de la vía aérea superior (área faríngea). Durante la inspiración, la contracción de los músculos ventilatorios (diafragma) provoca una presión pleural subatmosférica (negativa) que se transmite a la vías aéreas, incluida la faringe, para dar lugar a la entrada de aire. En la región faríngea esta presión negativa tiende a colapsar su luz, cosa que no ocurre en condiciones normales gracias a la acción de los músculos de la vía aérea superior. Cuando falla este proceso, se producen las apneas obstructivas, que son las más frecuentes. Las apneas centrales, que son muy poco frecuentes, ocurren por un defecto de los centros respiratorios o de sus receptores; al perder su ritmicidad los centros, aparecen las apneas.

La clave para establecer el diagnóstico del síndrome de las apneas durante el sueño estriba en su sospecha clínica. El enfermo prototipo suele ser un hombre de mediana edad, obeso, roncador de larga evolución que acude a la consulta por hipersomnia diurna y que padece hipertensión arterial. Aunque menos frecuente, las apneas pueden presentarse también en individuos no obesos, e incluso en niños, en general portadores de hipertrofia amigdalar o retrognatia y que aquejan bajo rendimiento escolar, ronquidos y respiración dificultosa durante la noche.

Para confirmarse el diagnóstico debe practicarse una polisomnografía. Esta recoge los siguientes parámetros: electroencefalograma, electrooculograma y electromiograma mentoniano, mediante

sendos electrodos convenientemente colocados, que nos permitirán saber si el enfermo duerme o no, así como el estadio del sueño en que se encuentra. Además, registra el flujo nasobucal, los movimientos torácico-abdominales y la oxigenación de la sangre (oximetría), que nos permitirán definir el tipo de apnea, así como su número.

El síndrome de apnea durante el sueño se presenta en un 2-4 % de la población. En este grupo de pacientes, la mortalidad es superior a la media general y se debe, principalmente, a complicaciones cardiovasculares y a accidentes de tráfico, estos últimos como consecuencia de la somnolencia que el síndrome provoca.

Por lo que concierne al tratamiento, se indican medidas generales: dieta en todos los casos de obesidad, prohibición de la ingesta de alcohol y sedantes en especial antes de ir a dormir e intentar mantener una buena higiene del sueño. Se recomienda tratar el hipotiroidismo, la acromegalia y demás enfermedades que influyen en el desarrollo del síndrome de las apneas durante el sueño. Cuando a pesar de ello no se consigue una mejoría evidente, puede recurrirse a la presión nasal de aire asistida y continua (CPAP), que se aplica mediante un compresor de aire y una mascarilla nasal; al mantener así abierta la vía aérea superior, se evita el colapso inspiratorio que condiciona la aparición de las apneas. El nivel necesario de presión para que esto se produzca (presión óptima) debe determinarse mediante una polisomnografía que asegure que la presión es adecuada en todas las fases del sueño (en REM la presión requerida suele ser mayor) y en todas las posturas del enfermo. Los efectos beneficiosos de la CPAP son casi inmediatos. Desde la primera noche, hasta aproximadamente los 15 días de utilización, se produce una mejoría progresiva en la estructura del sueño y, por tanto, en la hipersomnia del enfermo. El tratamiento deberá mantenerse de forma permanente, a no ser que las condiciones clínicas varíen y produzcan una reducción importante en el número de apneas. El ejemplo típico es en el caso de reducción importante de peso en un paciente con obesidad. Cuando los pacientes no toleran la CPAP nasal o que tienen factores anatómicos que le comprometan la vía aérea superior, existen opciones quirúrgicas muy prometedoras que están en plena fase de desarrollo.

J. M. Montserrat
Servicio de Neumología
Hospital Clínico de Barcelona

Ciberespacio

Nuevas ideas para mundos nuevos

Desde que William Gibson acuñó la voz "ciberespacio", los investigadores han venido esforzándose en crear los mundos descritos por Gibson: "un reflejo alucinatorio consensual —líneas de luz en el no-espacio de la mente, racimos y constelaciones de datos. Como luces de la ciudad, en retroceso." La seducción de un mundo cuyos hitos nos son familiares, sumada a la libertad y la curiosidad ilusionada que sólo el ordenador puede suscitar, parece irresistible. Puede también que sea imposible de obtener: la navegación por un mundo de información resulta muy distinta de la exploración de ámbitos más familiares. La exacta medida de su disparidad es cosa que los investigadores están poco a poco empezando a comprender.

Durante los últimos diez años, los problemas de creación de ciberespacio les han resultado a muchos científicos menos absorbentes que la producción de realidades virtuales, que los problemas de mover por la pantalla el número suficiente de píxeles para ofrecer imágenes realistas. Sin embargo, los problemas que plantea extraer el significado de vastas cantidades de información corren a mucha mayor profundidad que los de conseguir figuras bonitas. Un concurso reciente, patrocinado por el Consejo Superior de de Arquitectura británico, para crear una nueva versión del Parlamento ilustra algunas de las dificultades.

El vencedor del concurso propuso un parlamento virtual. Los jueces quedaron convencidos por el razonamiento del ganador: el edificio de estilo gótico victoriano, méritos arquitectónicos aparte, constituía un incordio para el buen desempeño de su función. En el edificio real, cuando se debate algo importante, la cámara rebosa de diputados, y apenas queda espacio para el público; en un mundo virtual la cámara podría ampliarse para dar cabida a cuantos estuvieran interesados. En teoría, los arquitectos de un parlamento virtual podrían hacer accesibles informaciones que ahora languidecen en archivadores cerrados con llave al final de pasillos inaccesibles. La cuestión es cómo.

Un parlamento virtual podría sin duda dejar a la información en libertad. Pero sería un contrasentido tener que



La perspectiva, que podemos apreciar en La Anunciación *de Leonardo da Vinci, fue introducida en el Renacimiento: reflejaba una nueva visión del mundo. Los arquitectos de ciberespacios se enfrentan igualmente a un mundo nuevo; también ellos pueden modificar radicalmente nuestra forma de percepción*

alcanzar esa información dando una caminata virtual a lo largo de un pasillo virtual, para llegar a una mohosa oficina virtual repleta de archivadores virtuales —como pretenden determinados anteproyectos. Por receptivos que se muestren ante las posibilidades teóricas, ni los expertos en diseño ni los informáticos rebosan de ideas para hacer que los mundos virtuales de Gibson pasen de ser artilugios. THOMAS, un programa que viene a ser el semblante virtual del Congreso de los Estados Unidos, nos muestra un rostro mucho más parecido a una ficha de biblioteca que a una realidad virtual tridimensional de ningún tipo.

La clave del dilema es que la familiaridad con el mundo real está inextricablemente entretejida con sus limitaciones. Por tranquilizadora que resulte la navegación en términos de arriba, abajo, izquierda y derecha, estos conceptos son, en un ordenador, cuando menos, arbitrarios, y en ocasiones, causa inmediata de confusión. Al mejorar los gráficos, resulta inevitable que la atención se traslade del movimiento de píxeles al más difícil problema de la construcción de mundos de apariencia natural e intuitiva, aunque la información que nos aporten nada tenga que ver con la naturaleza o la intuición.

La creación de ciberespacio puede resultar difícil incluso cuando los datos manejados son de naturaleza geográfica o, si se quiere, arquitectónica. En Alemania, los investigadores de Arte+Comunicaciones (Art+Com) están esforzándose por llevar a la práctica una idea que ha estado rondando desde hace mucho. Para hacer más accesibles las múltiples informaciones recogidas por sistemas que supervisan la Tierra —desde los satélites de infrarrojos hasta los circuitos cerrados de televisión de las galerías comerciales— el programa permite al usuario volar alrededor del mundo y examinar de cerca cualquier vista que excite su curiosidad. Aunque semejante capacidad da la impresión de ser muy divertida, deja también muchas preguntas sin respuesta. Ciertas peticiones no tienen cabida en la metáfora: por ejemplo, cómo hacer para moverse no sólo en el espacio sino en el tiempo. Otras se adaptan a la perfección; por ejemplo, la búsqueda de un determinado edificio en Tokio, cuyas calles no están rotuladas.

Conforme van penetrando en el reino de la información computarizada, los investigadores se ven inevitablemente arrastrados desde el realismo virtual hacia los símbolos abstractos mediante los cuales se construyen de forma más natural tales mundos. Ben A. Shneiderman ha creado un sistema para simplificar la adquisición de vivienda. En lugar de bajar zumbando por calles virtuales de zonas residenciales, Shneiderman utiliza un mapa sobrio. Al buscar vivienda, muchos de los parámetros más importantes nada tienen que ver con la geografía; así, el precio, el número de dormitorios, el estilo de la vivienda, etc. Shneiderman llevó estas dimensiones a la abstracción del mapa, creando controles que permiten al usuario ajustar el enfoque para determinar qué casas van a aparecer: por ejemplo, viviendas unifamiliares con tres dormitorios y dos garajes que cuesten menos de 30 millones.

En el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto, Stuart Card se esfuerza en hacer más comprensibles incluso las representaciones más abstractas que pueda mostrar una pantalla. Parte de su tarea trata de aspectos que imponen limitaciones responsables de que los acontecimientos de la pantalla resulten naturales o no. Las demoras inferiores a una décima de segundo hacen que casi todo el mundo comience a perder la noción de secuencia entre acontecimientos. Si la demora es mucho mayor que una décima de segundo, el movimiento se torna discontinuo. Cuando la demora excede de un segundo, casi todo el mundo da signos claros de impaciencia, pues se espera que ocurra algo.

Pero el mayor problema que ha de afrontar Card es la creación de sentido de perspectiva en la pantalla de un ordenador. Las ventanas actuales son incoherentes. Cada una muestra una pequeña porción de una vista o de un programa diferente, sin el menor sentido de cómo se relacionan unas con otras, si lo están. La mayoría de los programas tampoco aclaran qué hay más allá del marco de la ventana. Ciertos trucos utilizados para establecer esa perspectiva buscan crear una ilusión de espacio. Por ejemplo, la "lupa para tablas" ideada por Card hace que parte de una tabla o de una hoja de cálculo parezca aproximarse hacia el observador mientras las demás cifras se hunden hacia el fondo, perdiendo legibilidad.

Lo que más se echa a faltar es perspectiva en el sentido lato de la palabra: una vista que hace perceptible el ámbito de la cuestión que nos ocupa. El reto que han de afrontar los expertos es la construcción sobre la pantalla de trazos que tengan en la mente correspondencia con ideas nuevas. Por mucho que avance la técnica, los problemas difíciles siempre van a exigir mucho más que el vuelo a través de columnas de luz. No hay duda de que una representación bien concebida puede facilitar la solución de problemas difíciles, al igual que los diagramas espacio-tiempo facilitaron a los físicos la imaginación simultánea del tiempo y el espacio. Pero en el caso del razonamiento abstracto, simbólico, es cuando menos igual de probable que tales representaciones se concreten en símbolos o diagramas, incomprensibles para los no iniciados, como que tomen formas familiares basadas en el paisaje. Mayores, de hecho: si la dificultad es resoluble con ideas ya familiares, no hay necesidad de inventar otras ni de crear nuevos símbolos para representarlas.

John Browning

Taller y laboratorio

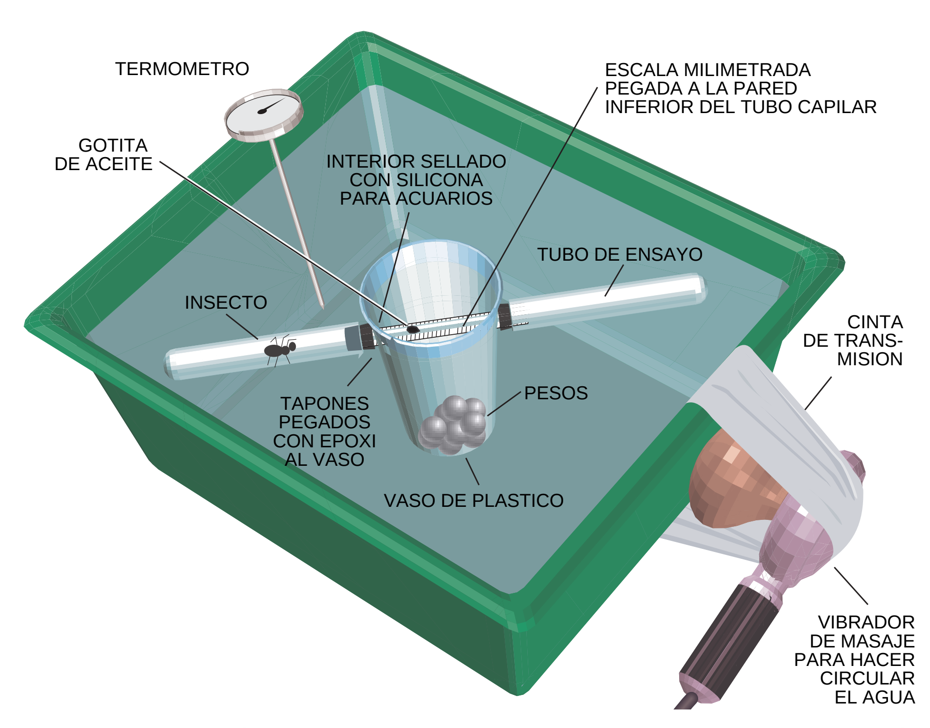
Shawn Carlson

Experimentos para medir el metabolismo de pequeños organismos

El metabolismo es una característica fundamental de la vida. Todo lo que respira combina la energía química almacenada en sus tejidos con el oxígeno contenido en la atmósfera, liberando energía para crecer, moverse y reproducirse. A pesar de prolongados esfuerzos, los biólogos sólo han desvelado, hasta el momento, los aspectos básicos del metabolismo. La riqueza de la vida es tal, que los descubrimientos esperan a cualquiera que se aventure con atención por estas aguas profundas. Por supuesto, pocos aficionados pueden enfrentarse a las numerosas complicaciones éticas y técnicas relacionadas con la experimentación en animales grandes o de sangre caliente. Afortunadamente, la mayor parte de las alrededor de 10 millones de especies (de animales) que pueblan la Tierra son bastante pequeñas y de sangre fría. De hecho, los insectos ofrecen miles de oportunidades a explorar por el investigador aficionado.

Resulta bastante sencillo medir el metabolismo de un insecto. Cuando se coloca un organismo en una cámara estanca, al respirar toma moléculas de oxígeno del aire y libera dióxido de carbono. Por lo común van a parar al aire menos moléculas que las que se extraen del mismo. La pérdida resultante relaja la presión en el interior de la cámara.

Esta caída de presión es un punto clave para determinar el metabolismo y puede observarse fácilmente mediante un aparato de Warburg [*véase la figura 1*], instrumento que consta de dos tubos de ensayo, provistos de tapones y conectados por un tubo capilar. Una gotita de aceite (o jabón) introducida en el tubo capilar se desplaza en respuesta a las diferencias de presión entre los tubos de ensayo. Por tanto, como la respiración de un insecto en uno de los tubos de ensayo da lugar a un descenso de la presión en este tubo, la gota de aceite se deslizará hacia él. Puede observar este movimiento si calienta con su mano uno de los tubos de ensayo. Esto hace que el aire contenido en el interior se expanda y empuje la gotita hacia el tubo de ensayo más frío. Para medir el desplazamiento de la gotita, fotocopie una regla graduada en milímetros y pegue la copia al tubo capilar.

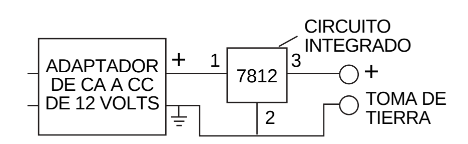


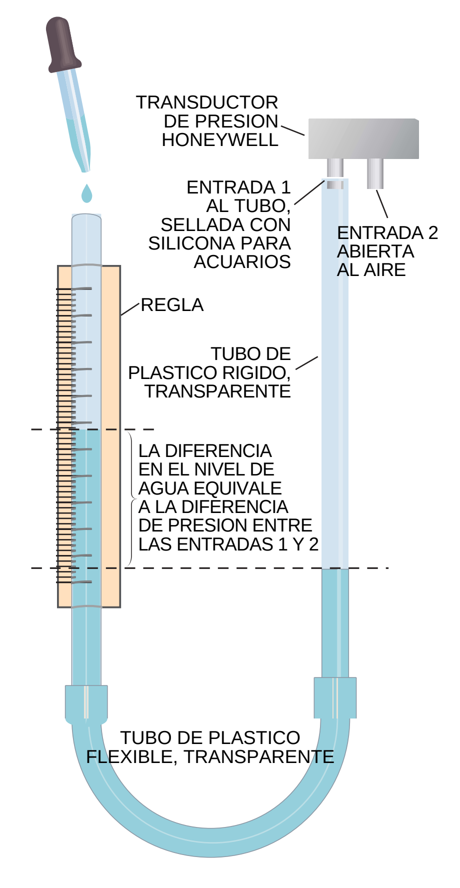
1. La respiración de un insecto se puede calcular conociendo la presión atmosférica, la temperatura del agua y la distancia recorrida por una gotita de aceite en el tubo capilar

Como se demuestra al calentarlo con la mano, el dispositivo es sensible a pequeñas diferencias de temperatura entre los tubos de ensayo. Para garantizar temperaturas iguales hemos de sumergir los tubos en una palangana con agua. Para mantenerlos debajo del agua, sujételos a las paredes de un vaso de plástico. Mantenga el vaso de pie sobre el fondo cargándolo con arena, grava o un puñado de calderilla. El vaso le permite también ver el aceite en el tubo capilar mantenido seco en el aire. Para aminorar más el efecto de los gradientes de temperatura, mantenga el agua en agitación suave con un aparato manual de los que se usan en el masaje corporal.

Si conoce la presión atmosférica, la temperatura del agua y la distancia a la que se desplaza la gota de aceite, puede determinar el número de moléculas que respira el insecto. El recuadro de la página siguiente da cuenta de las relaciones exactas.

El paso siguiente consiste en hallar la proporción entre el dióxido de carbono producido y el oxígeno consumido. Esta relación se denomina cociente respiratorio y constituye una determinación fundamental en el metabolismo. Le indica qué combustible biológico está utilizando el organismo. Si consume azúcar, el cociente vale 1; para la grasa, aproximadamente 0,70; para las proteínas, sobre 0,80; para el alcohol, alrededor de 0,67.





2. La calibración de un transductor Honeywell se basa en la diferencia entre el nivel de agua en dos tubos rígidos (derecha). *Un microcircuito de tipo 7812* (arriba) *alimenta el transductor. Para desatascar cualquier gota que quede atrapada, se inserta un alambre en los tubos*

Para la mayoría de los animales el valor del cociente oscila entre 0,72 y 0,97, debido a que los organismos metabolizan simultáneamente distintos tipos de fuentes de energía.

A la hora de medir el cociente respiratorio, necesitará algo de hidróxido sódico (NaOH), que absorbe el dióxido de carbono del aire. Adquiera este compuesto en forma sólida a cualquier proveedor de productos químicos; consulte las páginas amarillas. Pero tenga cuidado: el hidróxido sódico es cáustico y le quemará la piel y los ojos si no se maneja de forma correcta. Debe utilizar guantes de goma y gafas de seguridad.

Antes de proceder a las pruebas, tendrá que eliminar todo el dióxido de carbono de los tubos de ensayo. Coloque algunos gramos de NaOH en uno solo de los tubos de ensayo. La punta de una media de nylon constituye una bolsa excelente para contener el producto químico; enrolle, arrugando, la parte abierta del nylon, para evitar que el insecto entre en contacto con el NaOH. Mida el tiempo que tarda la gota en dejar de desplazarse, es decir, el NaOH en eliminar el dióxido de carbono del aire. Asegúrese de que espera por lo menos ese tiempo antes de empezar cada ensayo. Es deseable que el sistema alcance el equilibrio rápidamente; por consiguiente, utilice mucho NaOH. (Lectores avispados pueden preguntarse acerca del vapor de agua, que también es absorbido por el NaOH; por razones técnicas, no afectará a las mediciones.)

Ahora está listo para empezar los experimentos. En primer lugar, coloque tanto la envoltura con el NaOH como el animalito en el interior de uno de los tubos de ensayo y en el otro ponga únicamente NaOH. Cronometre lo que tarda la gotita en recorrer una distancia cinco veces superior, como mínimo, a la menor que marca su escala. Luego efectúe una segunda prueba exactamente de la misma duración, pero sólo con el organismo. El recuadro da cuenta de las ecuaciones necesarias para obtener el cociente respiratorio. Advierta que sus resultados sólo serán válidos: si el organismo está en la misma condición física en los dos ensayos (no, por ejemplo, en reposo en uno y agitado en el otro), si el NaOH elimina todo el dióxido de carbono del aire antes de iniciar este ensayo y si la duración de las dos pruebas es exactamente la misma.

Con una inversión aproximada de unas 12.500 pesetas, puede obtener datos de nivel profesional, aptos para su publicación en una revista técnica. Necesitará un transductor electrónico de presión diferencial, un dispositivo que convierte diferencias de presión en voltajes, que pueden medirse con un voltímetro. Yo utilizo un modelo de Honeywell (N.º 163PC01D36), capaz de registrar diferencias de presión

Calculando la respiración

El número de moléculas que respira el organismo, o ΔN, es igual a $9{,}655 \times 10^{16}\ PA\Delta L/T$. Aquí P es la presión atmosférica en centímetros de mercurio (si no dispone de un barómetro, telefonee al servicio meteorológico local dondequiera que realice un ensayo), A es el área interna de la sección del tubo capilar en milímetros cuadrados, ΔL es la distancia que recorre la gotita en milímetros y T es la temperatura del agua del baño en kelvins. Para pasar de grados Celsius a kelvins, sume 273,15. La constante numérica la he derivado a partir de las relaciones de la física implicadas.

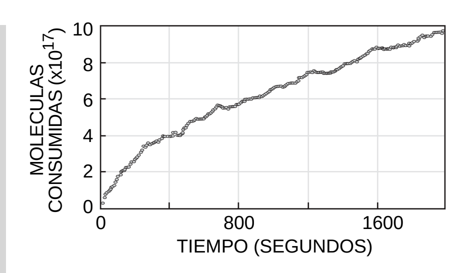
No resulta difícil calcular el cociente respiratorio: la proporción entre moléculas de dióxido de carbono liberadas y el número de moléculas de oxígeno consumidas. Dicho cociente es igual a

$$\frac{\Delta N_{O+NaOH} - \Delta N_O}{\Delta N_{O+NaOH} + \Delta N_O} = \frac{\Delta L_{O+NaOH} - \Delta L_O}{\Delta L_{O+NaOH} + \Delta L_O}$$

donde ΔN_O es el número de moléculas extraídas del aire por el organismo, y ΔN_{O+NaOH} el número de moléculas extraídas cuando el organismo y el NaOH están en el tubo de ensayo.

Como ocurre en el caso de ΔN, los subíndices indican las condiciones de la prueba: o bien con el organismo solo o con el organismo y el NaOH. Advierta que no necesita conocer la presión atmosférica, la temperatura ni el área del tubo capilar si sólo le interesa conocer el cociente respiratorio.

Si utiliza el transductor de presión diferencial, las ecuaciones son algo diferentes. El valor de ΔN es igual a $0{,}710 \times 10^{19}\ V\Delta P/T$, donde V es el volumen en centímetros cúbicos del tubo de ensayo que contiene el organismo (descontando el volumen ocupado por el insecto y el NaOH), ΔP es el incremento de presión en centímetros de agua, y T la temperatura del baño de agua en kelvins. En este caso el cociente respiratorio es igual a $(\Delta P_{O+NaOH} - \Delta P_O)/(\Delta P_{O+NaOH} + \Delta P_O)$, donde ΔP_{O+NaOH} es el cambio de presión medido tanto con el organismo como con el NaOH en el tubo de ensayo, y ΔP_O es el cambio de presión determinado con la única presencia del organismo.



3. La respiración de un escarabajo registrada a lo largo del tiempo indica, a través de las depresiones en la curva trazada, que el insecto "exhala" alrededor de una vez cada siete minutos. (Datos obtenidos sin NaOH.)

de hasta un 0,0003 por ciento de atmósfera.

El circuito de alimentación para el instrumento no puede ser más sencillo. Consiste en un adaptador de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) acoplado a un microcircuito integrado del tipo 7812. Su voltaje deriva un poco, haciendo que la señal de salida del transductor fluctúe en unos 10 milivolts, pero esto no debería representar ningún problema importante.

Necesitará calibrar el transductor con un manómetro —un tubo de plástico transparente en forma de U que contiene algo de agua en su interior [*véase la figura 2*]. He fabricado el mío con dos tubos finos y rígidos que he comprado en la sección de jardinería de una ferretería. Las tiendas de acuarios también venden tubos de este tipo. He unido las dos piezas insertando cada una en el extremo opuesto de un tubo de plástico acrílico flexible de unos 15 cm de longitud. La diferencia entre la altura alcanzada por la columna de agua a cada lado de la U es una medida directa de la presión. Puede representar el voltaje de salida en función de esta diferencia, en centímetros.

El transductor tiene dos entradas que permiten una conexión fácil con los tapones de goma de cada tubo de ensayo del aparato de Warburg. Recurrí a este montaje para medir el cociente respiratorio de un escarabajo, cuyo valor resultó ser de 0,701, promediando varios ciclos respiratorios. Naturalmente, también se puede medir el metabolismo de otros seres vivos: hongos, semillas, moho del pan, por citar alguno.

(Merece un especial agradecimiento John Lighton, profesor de biología de la Universidad de Nevada, por la ayuda prestada en la preparación de esta sección.)

Juegos matemáticos

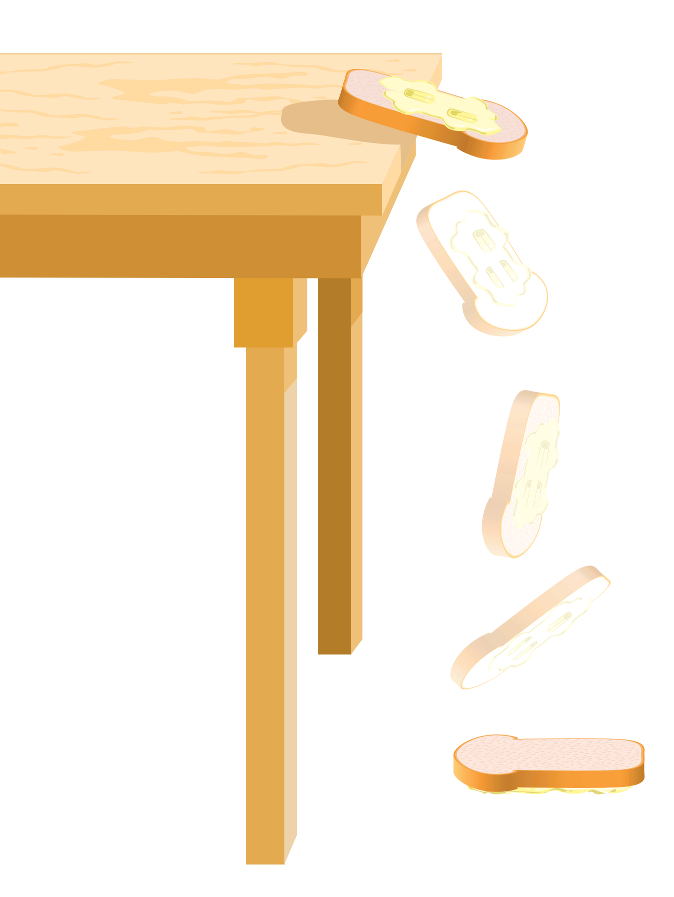
Ian Stewart

El principio antropomúrfico

Nunca he tomado tostadas
especialmente largas o anchas.
Mas cuando caen a un suelo de arcilla
Siempre lo hacen sobre la mantequilla.

Así escribía el poeta James Payn, parodiando los versos que Thomas Moore dedicó a una gacela en "Los adoradores del fuego". El fenómeno que Payn describe constituye una instancia arquetípica de la ley de Murphy, ley que estipula que, si algo puede ir mal, irá mal. Murphy, capitán de la fuerza aérea estadounidense —no hay premio por adivinar su nombre de pila— formuló esta observación a finales de los años cuarenta. Su ley tiene una muchedumbre de variantes como, "Aunque sea imposible que salga mal, saldrá mal." Y en 1991, una serie de televisión de la BBC, titulada *QED*, estuvo a punto de refutarla.

El presentador del programa lanzó al aire una tostada 300 veces en diversas condiciones y comprobó que no propendía a caer sobre la cara untada. La verdad es que los resultados eran estadísticamente indistinguibles del puro azar. Y así hubieran quedado las cosas de no ser por Robert Matthews, periodista británico que tiene una vena matemática. Matthews, escribiendo en el *European Journal of Physics*, planteó dos objeciones a los experimentos de *QED*. En primer lugar, la ley de Murphy, por su misma naturaleza, podría conspirar contra cualesquiera experimentos destinados a comprobarla. Y en segundo, al desayunar no es corriente lanzar al aire las tostadas: si caen, suele deberse a que son empujadas involuntariamente hacia el borde de la mesa. Los experimentos de *QED* deberían haber remedado ese mismo movimiento.



Antes de proseguir, importa señalar que la mantequilla nunca supone más del 10 por ciento del peso total de una tostada típica. La mayor parte de esta masa añadida queda embebida en la miga del pan. Así pues, este recubrimiento tiene escaso efecto en la dinámica de la tostada voladora. Todavía más despreciables son los efectos sobre la aerodinámica de la tostada provocados por los cambios de viscosidad superficial. Además, Matthews retrotrae la ley de Murphy a una asimetría más sencilla: dado que la superficie de la tostada está untada, esa misma superficie sigue estando arriba cuando se empuja la tostada sobre el borde de una mesa.

En su caída hacia el suelo, la tostada gira con una velocidad angular determinada por el grado en que su centro de masa sobresalió del borde de la mesa al empezar el descenso. ¿No podría ser que la altura de una mesa normal y la fuerza gravitatoria terrestre conspirasen para crear una predominancia de rotaciones cuya amplitud fuera múltiplo impar de 180 grados? De acuerdo con los cálculos de Matthews, la respuesta, muy breve, es que sí. En realidad, lo que más ocurre es un giro que da media vuelta a la tostada, haciéndola tomar tierra con la mantequilla hacia abajo.

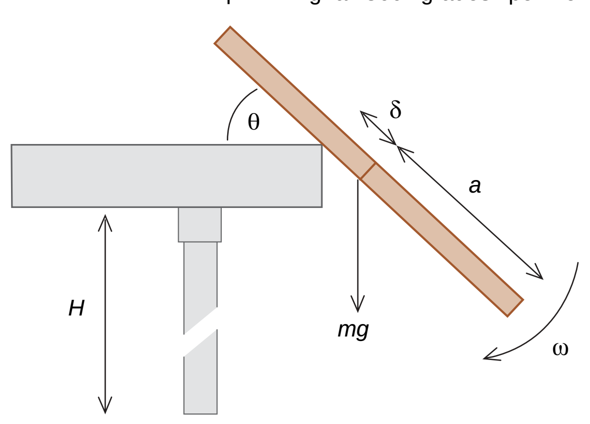
Antes de examinar las razones que subyacen a tan infeliz coincidencia sería conveniente resumir los razonamientos matemáticos de Matthews. La ilustración de la página siguiente muestra la configuración inicial de la tostada y las principales variables que intervienen, juntamente con cierto número de fórmulas clave deducidas de las leyes newtonianas del movimiento. La principal conclusión es que la tostada no puede aterrizar "mantequilla arriba" a menos que "el parámetro de voladizo crítico" —el tanto por ciento de tostada que sobresale de la mesa justo antes de empezar a caer, tomando como 100 la mitad de la anchura de la tostada— sea al menos del 6 por ciento. La experiencia demuestra que, en el caso del pan, este valor es del 2 por ciento, y que para la tostada es del 1,5 por ciento. Ambos son demasiado pequeños para que el pan o la tostada giren al menos 360 grados en su caída hacia el suelo. Y dado que se puede demostrar que el giro es de 180 grados por lo menos, el resultado inevitable es el aterrizaje sobre la cara untada.

La tesis de Matthews se funda en cierto número de hipótesis, una de las cuales supone que la tostada no rebota al llegar al suelo. El resultado típico, después de todo, es un "plaf", no un "boing". Otro de los supuestos consiste en que la tostada se desplaza lentamente sobre el borde de la mesa, por lo que se desprende cuando, haciendo voladizo, alcanza el valor crítico. No parece haber dificultad en aceptarlo. A menos que la velocidad horizontal impartida a la tostada al salir por el borde alcance los 1,6 metros por segundo —un galope bastante vivo—, tal velocidad no afecta demasiado a la caída. Así pues, si observásemos que la tostada se nos va de la mesa, podríamos darle un manotazo enérgico. Tal estrategia tal vez no consiga salvar la tostada,

Murfodinámica de la tostada

Denominemos η al parámetro de voladizo crítico, la porción inicial de tostada que sobresale de la mesa, dividida entre la mitad de la anchura de la tostada. Entonces, las leyes del movimiento de Newton conducen a la relación $\omega^2 = (6g/a)(\eta/(1 + 3\eta^2))$ sen θ, durante el tiempo en que la tostada está pivotando en torno al borde de la mesa. La tostada comienza a deslizarse cuando su peso vence a la fuerza de rozamiento en el borde de la mesa. La velocidad angular con que gire en ese instante será la velocidad con la que va a girar durante la caída.

Estimaciones sencillas indican que la tostada va a girar por lo menos 180 grados en su camino hacia el suelo. Para que al aterrizar quede con la mantequilla hacia arriba habrá de girar 360 grados por lo menos. Sabemos la rapidez con que la tostada está girando, y *H*, juntamente con *g*, nos dice cuánto tiempo pasará hasta que la tostada llegue al suelo. Matthews demuestra que en el caso de mesas y tostadas de dimensiones habituales, la tostada sólo gira 360 grados por lo menos cuando el parámetro crítico es mayor que 0,06, lo que no suele acontecer. El voladizo crítico se produce cuando la tostada empieza a desprenderse de la mesa y a caer libremente.



g = aceleración de la gravedad terrestre
m = masa de la tostada
a = semianchura de la tostada
δ = voladizo inicial
θ = ángulo de giro
ω = velocidad angular del giro
H = altura de la mesa

pero quizá sí evitar que se embadurne la alfombra.

Todo este análisis está muy bien, pero induce a pensar que la ley de Murphy es una mera coincidencia, un caso curioso de "murfi-resonancia" resultante de los valores arbitrarios que la cultura humana le ha asignado a las mesas y a las tostadas, en conjunción con la intensidad, igualmente arbitraria, del campo gravitatorio terrestre. En realidad, como Matthews demuestra, nada es menos cierto. La ley de Murphy, concretada en la tostada, es una consecuencia profunda de las constantes fundamentales de la naturaleza. Cualquier universo que contenga criaturas remotamente parecidas a nosotros habrá por necesidad de infringir la ley de Murphy sobre sus habitantes —al menos, si toman tostadas y desayunan sentados a la mesa.

El razonamiento exacto es técnico y prolijo, pero sus líneas maestras son sencillas. La pieza clave de información se debe a William H. Press quien enunció en 1980 que la estatura de un organismo capaz de ambulación bípeda está limitada por el campo gravitatorio en el que habite. Los bípedos son intrínsecamente inestables. Basta que la vertical de su centro de masa sea exterior a la superficie de sustentación para que pierdan el equilibrio. También los cuadrúpedos, pero su polígono de sustentación es mucho mayor; no es de sorprender que las jirafas tengan mayor estatura que los humanos.

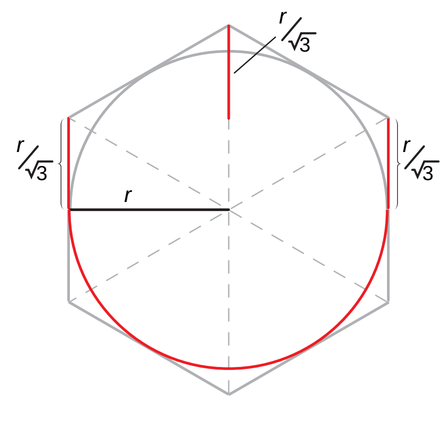
La estatura máxima de un bípedo es aquella que, de llegar el organismo a caer, el daño que su cabeza sufriera probablemente le causaría la muerte. Es razonable suponer que la altura de la mesa utilizada por un bípedo inteligente tal rondase en torno a la mitad de su estatura. En la Tierra, para que se infrinja la ley de Murphy la mesa habría de tener unos 3 metros de alta, así que nosotros habríamos de medir en torno a 6 metros para escapar a las desdichadas consecuencias de la resonancia múrfica. Una buena cuestión sería la siguiente: ¿podría alguna raza de extraterrestres, afincada en algún lejano planeta, ser múrficamente inmune?

Acuse de recibo

Varios lectores me escribieron indicando que Sherlock Holmes pudo haber ahorrado algo más de tiempo en su búsqueda del Chivo de Aldeatétrica ("Sucio robo en Aldeatétrica", noviembre de 1995) mandando cavar una zanja discontinua. Geoffrey L. Phillips expuso el caso con elocuencia.

"La cuestión no consistía en hallar la trinchera continua más corta, sino determinar la mínima longitud a cavar. En lugar de las distancias AB y CD —cuya longitud sería de 200 metros— debieron abrirse 58 m desde B hacia A, y 58 m desde C hacia D. Entonces, una sola zanja más de 58 m —a medio camino entre ambas, aunque más próxima al centro— habría rematado la tarea, con una longitud total habría sido de $(\sqrt{3} + \pi)r$" (*líneas rojas*).

Mi solución dio una zanja de longitud $(2 + \pi)r$. El método de Phillips abre toda un nuevo abanico de cuestiones. En particular, con dos zanjas, ¿se podrá mejorar su método? ¿Y si se abren tres o más? *—I. S.*



Para averiguarlo, Matthews modeliza al extraterrestre mediante un cilindro de polímero rematado por una esfera testiforme. Llamaré "polimurfos" a tales organismos. La muerte se produce si los enlaces químicos de una capa de polímeros llegan a romperse. Matthews determina que la estatura de un polimurfo viable es a lo sumo $(3nq/f)^{1/2}\mu^2 A^{-1/6}(\alpha/\alpha_G)^{1/4}a_0$. En esta expresión, n es el número de átomos de un plano a través del cual se produce alguna ruptura (valor típico, alrededor de 100); q es igual a 3×10^{-3}, una constante relacionada con los polímeros; f es la fracción de energía cinética que interviene en la ruptura de enlaces poliméricos; μ es el radio de los átomos poliméricos, en unidades de radios de Bohr; A es la masa atómica del material polimérico; α es igual a la constante de estructura electrónica fina $e^2/(2h\varepsilon_0 c)$, donde e es la carga del electrón, h es la constante de Planck, ε_0 es la permitividad del espacio libre, y c es la velocidad de la luz; α_G es la constante de estructura gravitatoria fina $2\pi G m_p^2/hc$, donde G es la constante universal de gravitación, y m_p es la masa del protón; y a_0 es el radio de Bohr.

Al introducir en la fórmula los valores pertinentes para nuestro universo, encontramos que la estatura máxima que un polimurfo puede tener sin peligro es de unos 2,95 metros. (Por cierto, el humano de mayor estatura del que se tenga noticia es un tal Robert Wadlow, que medía 2,72 metros.) Esta estatura se halla muy por debajo de los 6 metros necesarios para evitar que se embadurne el suelo de la cocina. Es interesante señalar que este límite superior sobre la estatura de los polimurfos no depende del planeta en que habite el extraterrestre. La causa es que el equilibrio entre las fuerzas gravitatorias internas y los efectos degenerativos de tipo electrostático y electrónico necesarios para evitar que el polímero se descomponga pone en relación la gravedad del planeta con constantes más fundamentales. Descubrimos así que la ley de Murphy no es en absoluto una coincidencia, sino resultado de cierto principio "antropomúrfico": cualquier universo construido atendiendo a líneas convencionales que contenga polimurfos inteligentes habrá de obedecer la ley de Murphy. Matthews concluye que "según Einstein, Dios es sutil, pero no malicioso. Es posible que así sea, pero está claro que Su influencia sobre la caída de las tostadas deja mucho que desear". El problema del mal sigue en pie.

Libros

Ignacio García de la Rosa, Luis Alonso y Ramón Margalef

Estructura

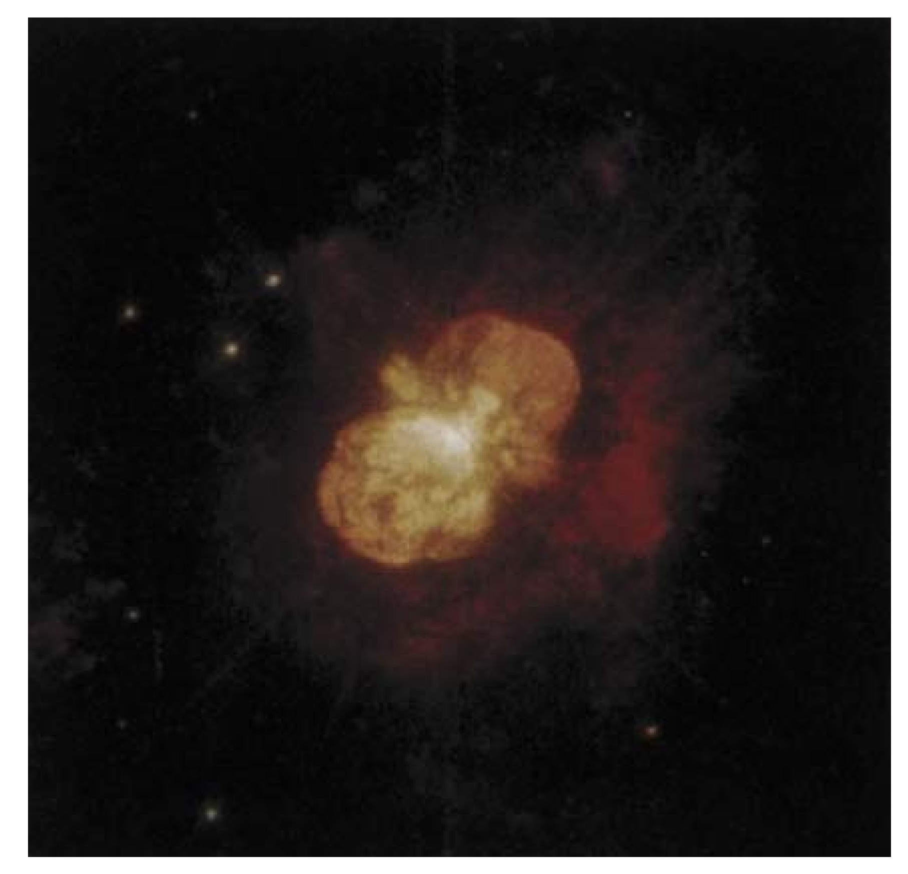
Y evolución estelar

THE STARS: THEIR STRUCTURE AND EVOLUTION, por R. J. Tayler. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

Este libro del profesor Tayler es especialmente entrañable para el que esto escribe. De la mano de su autor, la edición anterior sirvió de libro de texto en la asignatura de estructura estelar correspondiente al máster de astronomía de la Universidad de Sussex.

El autor proporciona un resumen del conocimiento actual de las estrellas. Un alto porcentaje de dicho conocimiento es probablemente cierto, pero no debemos olvidar que, para alcanzarlo, se ha debido recorrer un camino muy tortuoso, lleno de dudas y contradicciones. Por ejemplo, en noviembre de 1929 se desató una "batalla" científica entre Eddington (Cambridge) y Milne (Oxford), que defendían teorías alternativas del interior estelar. Lo de menos es que ganara Eddington. Lo importante es que el debate atrajo la atención de científicos jóvenes de gran talento como T. G. Cowling, L. F. Biermann, B. Strömgren y S. Chandrasekhar. El estudio de la estructura estelar se enriqueció con la contribución de estos notables recién llegados.

Gran parte del armazón de la teoría del interior estelar fue construido por Eddington hacia mediados de los años veinte. Se creía que el Sol era una esfera gaseosa y turbulenta compuesta de elementos químicos normales, mezclados en proporciones terrestres. El gas se calentaba hasta alcanzar una incandescencia viscosa. También se pensaba que las estrellas evitaban el colapso gravitatorio gracias a una fuerza ascendente ligada a los movimientos turbulentos que los astrónomos, con ayuda del telescopio, observaban en la superficie del Sol.



Eta Carinae. *La capa externa está compuesta de nitrógeno y otros materiales eyectados por la estrella*

Las primeras investigaciones de Eddington sobre la estructura estelar no tuvieron al Sol en su punto de mira, sino a las estrellas gigantes descubiertas por Russell, mucho mayores y menos densas que el Sol. La ventaja de estas estrellas tan etéreas radicaba en la posibilidad de aplicarles las ecuaciones de estado de los gases perfectos, mucho más sencillas que las de gases imperfectos, desarrolladas por van der Waals.

En plena primera guerra mundial, Eddington presentó su teoría del equilibrio radiativo en estrellas. De acuerdo con uno de sus resultados, la presión de radiación ejercida por los fotones contrarrestaba la tendencia hacia el colapso gravitatorio. Hoy en día, sabemos que en la mayoría de las estrellas esta presión es despreciable, en comparación con la del gas, pero a Eddington este error le sirvió para deducir las enormes temperaturas que existen en el interior de las estrellas. Este hallazgo desbloqueó dos problemas: el estado del material estelar y la fuente de energía.

Los descubrimientos sobre la estructura del átomo realizados por Bohr y Rutherford permitieron sospechar que, a esas temperaturas, los átomos se encontrarían muy ionizados. Un gas de átomos con alta densidad no se parece a un gas perfecto. Sin embargo, en un gas muy ionizado las partículas, electrones y núcleos, son tan pequeñas que aquél se comporta como gas perfecto a pesar de poseer una alta densidad. De esta forma, las teorías de Eddington, válidas para estrellas gigantes, pudieron extenderse a estrellas densas, como el Sol.

El otro aspecto que resultó desbloqueado por el hallazgo de altas temperaturas fue el de la fuente de energía estelar. Hacia los años veinte, tras quedar descartadas las energías química, gravitatoria o de fricción, las sospechas comenzaban a apuntar a algún proceso subatómico del tipo de la aniquilación electrón-protón o fusión de protones. Para aceptar la segunda de estas posibilidades había que entender primero cómo podían fundirse los protones entre sí, o los protones y núcleos, venciendo la mu-

tua repulsión electrostática. George Gamow encontró la explicación en las altas temperaturas predichas por Eddington y en la física cuántica. Las altas temperaturas proporcionan a las partículas energía cinética suficiente como para acercarse al núcleo. El efecto túnel de la física cuántica permite al protón o partícula alfa atravesar la última barrera de potencial del núcleo y fundirse con él.

Los astrofísicos carecían de conocimientos suficientes para resolver los detalles del problema. Por su lado, hacia 1936-38, los físicos nucleares se encontraban volcados en la experimentación, pero la belleza del problema atrajo la atención de algunos de los mejores teóricos: Bethe, Gamow, Oppenheimer y Teller en Estados Unidos; F. von Weizsäcker en Alemania, y Lev Landau en la Unión Soviética. Bethe fue el primero en encontrar la solución: una cadena de reacciones que comenzaba con la colisión de dos protones y terminaba con la síntesis de un núcleo de helio.

Todos los ingredientes de la mencionada reacción nuclear (cuatro protones) pesan más que el producto resultante (un núcleo de helio). En consecuencia, cada vez que se produce la reacción, esa pequeña diferencia de masa se convierte en energía, de acuerdo con la ecuación de Einstein. Un solo gramo de materia equivale a la energía resultante de quemar 32 millones de litros de gasolina y en el Sol, cada segundo se convierten en energía 5 millones de toneladas de su masa. A pesar de esta pérdida tan impresionante, el final de una estrella está más ligado a los cambios de composición química que se producen en su interior, que a la mencionada pérdida de masa.

Desde estos descubrimientos, la astrofísica empezó a ver a las estrellas como auténticas explosiones nucleares que están teniendo lugar ante nuestros ojos. Dichas explosiones no acaban con la vida de la propia estrella gracias al efecto de válvula térmica que ejerce la enorme envoltura que rodea al núcleo de la estrella. Si las reacciones nucleares se descontrolaran y aumentaran de ritmo, la estrella se calentaría y aumentaría su volumen, disminuyendo su densidad. Como consecuencia, disminuiría automáticamente el ritmo de producción de energía. Si, por el contrario, disminuyera el ritmo de las reacciones, la estrella colapsaría y se calentaría.

Otra batalla que hubo que superar fue la referente a la composición química de las estrellas. El estudio que permitiría interpretar las abundancias relativas atendiendo a la intensidad de las líneas fue iniciado por M. Saha. Teniendo en cuenta las condiciones físicas reinantes en la capa de atmósfera que absorbe las líneas, se puede conocer el estado de excitación de los átomos. La intensidad de una línea no depende de la abundancia de átomos de ese elemento, excitados en el estado adecuado para emitirla. En resumen, pueden existir líneas débiles de un elemento tan abundante como el hidrógeno.

Cecilia Payne, en 1925, aplicando estas nuevas técnicas de interpretación espectral, descubrió que el hidrógeno y el helio eran los elementos más abundantes en las atmósferas estelares. Eddington, Jeans y, sobre todo, Russell, seguían convencidos de que la composición del Sol era similar a la de la Tierra. En 1929, tras varios años de ataques contra Payne, Russell se convertía en el más ardiente defensor de la preponderancia del hidrógeno en las estrellas. (I. G. R.)

Virología

Naturaleza y evolución

HISTOIRE DES VIRUS. DE LA VARIOLE AU SIDA, por Claude Chastel. Société Nouvelles des Éditions Boubée; París, 1992. **CLASSIFICATION AND NOMENCLATURE OF VIRUS**. Dirigido por R. Francki *et al*. Springer Verlag; Viena, 1991.

THE EVOLUTIONARY BIOLOGY OF VIRUSES. Dirigido por Stephen S. Morse. Raven Press; Nueva York, 1994. **MOLECULAR BASIS OF VIRUS EVOLUTION**. Dirigido por Adrian J. Gibbs *et al*. Cambridge University Press; Cambridge, 1995.

THE SEARCH FOR ANTIVIRAL DRUGS. Dirigido por Julian Adams y Vincent J. Merluzzi. Birhäuser; Boston, 1993. **RESISTANCE TO VIRAL DISEASES OF VEGETABLES. GENETICS AND BREEDING**. Dirigido por Molly M. Kyle. Timber Press; Portland, 1993.

Ninguna rama biológica se ha beneficiado tanto del progreso reciente en las ciencias de la vida como la virología. Porque en ésta también se ha llegado a extremos de especialización puntillista, conviene hacer un alto y echar una mirada panorámica al estado de la cuestión. Los seis libros de la reseña nos ofrecen una idea bastante cabal de sus perfiles. Los dos primeros, sobre historia y taxonomía, permiten seguir la parábola que arranca de los orígenes hasta su cristalización sistemática; de la constitución genética y evolución de los virus se ocupa el par central. Por fin, dos aproximaciones a la vertiente práctica, la que incide en los humanos particularizada sobre todo en el virus del sida y otra más extensa sobre patógenos vegetales.

Con claridad cartesiana, Chalmers deslinda en *Histoire des virus* su lenta separación de la silva de conceptos en que se enmarañaba la bacteriología de finales del siglo pasado y comienzos del nuestro: microbios, enzimas, toxinas, moléculas coloidales y así por demás. En un comienzo el virus se definió por sus caracteres negativos. Era el microorganismo que no lo retenía el filtro donde sí quedaban ancladas las bacterias; de ahí su primera denominación de "virus filtrante". Tampoco medraba en cultivos bacterianos, ni se percibía con el microscopio óptico, lo que le convertía en un "ultravirus". Y así hasta recibir una definición positiva: entidad constituida por un solo ácido nucleico (ADN o ARN) y proteínas, visible al microscopio electrónico y dotada de estructura precisa, que se multiplica sólo en el huésped.

La era de los virus filtrables y ultravirus se extiende hasta 1934. En un principio rudimentaria y artesanal, la técnica de filtración mejoró con el uso de cerámicas. Dmitri Iosofovich Ivanovski, un joven fitopatólogo ruso, las empleó en 1892 cuando estudió una enfermedad de las plantas del tabaco denominada "mosaico" (porque las hojas atacadas presentan manchas coloreadas, amarillas o marrones) y corroboró que la savia de las infectadas reproducía la enfermedad si se la introducía en plantas de tabaco sanas.

Martinus Willem Beijerinck confirmó en 1898 y 1899 que el agente responsable del mosaico del tabaco atravesaba los filtros, que resistía el calentamiento y que persistía meses sin perder su carácter infeccioso. Pero, sobre todo, llegó a la conclusión de que este agente se multiplicaba en los tejidos infectados. No podía, por tanto, tratarse de una toxina bacteriana. Llamó a este principio filtrable y capaz de replicarse *Contagium vivum fluidum*, es decir, "líquido vivo contagioso".

Se multiplicaron los hallazgos de virus filtrables. En 1898, Nocard

descubría el agente de la peripneumonía de los bóvidos y Sanarelli el de la mixomatosis del conejo; en 1900, M'Fadyean observaba la filtrabilidad del virus de la peste equina africana; en 1901, Centanni encontraba el de la peste aviar; en 1902, Nicolle y Adil-Beyel daban cuenta del virus de la peste bovina. En este último año Reed y Carrol confirmaron la tesis formulada en 1881 por Carlos Finlay de que la fiebre amarilla se transmitía por el mosquito *Stegomya fasciata* (*Aedes aegyptii*).

Un paso fundamental fue el dado en 1935 por Stanley al purificar el virus del mosaico del tabaco y obtenerlo bajo forma de una proteína cristalizada que conservaba el poder infeccioso original. En 1936 un equipo dirigido por Badwen publicó ciertos resultados sobre el virus del mosaico que divergían algo de los de Stanley. Informaron que la proteína del virus contenía, además de carbono, nitrógeno e hidrógeno, cantidades no despreciables de azufre, fósforo y ribosa, lo que denunciaba la presencia de ARN. En 1936 se mostrará que el bacteriófago contiene ADN y, desde 1939, se sabrá que determinados virus vegetales son de naturaleza nucleoproteica. Hasta 1955 no se obtuvo la purificación adecuada y cristalización de un virus humano, el de la poliomielitis. Las primeras microfotografías, de 1939, correspondieron, cómo no, al virus del mosaico del tabaco. Dos años después los estudios cristalográficos de Bernal y Frankuchen revelaban que el virus del mosaico del tabaco tenía una simetría helicoidal.

Desde los años sesenta los progresos de la virología quedan archivados en un rico vocabulario cuyo origen le llevará el lector a otros tantos hitos: profago, fago atemperado y fago virulento, episoma, gen estructural, gen regulador, permeasa, operón, ARN mensajero, proteínas alostéricas, etc. El común denominador es la referencia molecular, que evidencia la incardinación de la bioquímica y la genética en la virología.

Con periodicidad irregular, el Comité Internacional de Taxonomía de Virus celebra una convención para reacomodar los nuevos virus descubiertos, mejorar las definiciones y completar los cuadros aceptados. Hemos escogido la quinta por constituir todavía el punto de referencia obligado: *Classification and Nomenclature of Viruses. Fifth Report of the International Committee on Taxonomy of Viruses*. Este informe contiene 2430 virus incluidos en 73 familias o grupos, así como descripciones de satélites y de viroides.



Dmitri Iosofovich Ivanovski (1864-1920)

Se hace especial hincapié en la normalización, que añade, a la denominación del virus, la señalización de la cepa. El desarrollo de la virología molecular y de los métodos estadísticos de clasificación no ha barrido la acostumbrada tarea de mostrar, dibujados, los grandes rasgos morfológicos. Un diagrama típico, pensemos en las familias de virus que se hospedan en los invertebrados, separa los que presentan cápside de los virus desnudos. Los primeros, si su material genético es de doble cadena de ADN, desarrollan una forma ovoidal (Poxviridae, Entomopoxvirinae), hexagonal (Baculoviridae, Eubaculovirinae), abastonada (Baculoviridae, Nudibaculovirinae), discoidal (Polydnaviridae, Ichnovirus) o en sartén (Polydnaviridae, Bracovirus). Si los virus protegidos con cápside contienen genoma de ARN de doble cadena, y según la figura se obtienen: Togaviridae, Bunyaviridae, Flaviviridae, Rhabdoviridae. Familias de virus desnudos que poseen doble cadena de ADN son Iridoviridae y Parvoviridae; con doble hebra de ARN, Reoviridae y Birnaviridae; con cadena sencilla de ARN, Picornaviridae, Tetraviridae y Nodaviridae. La clasificación no se detiene en el taxón de familia, por supuesto, sino que se prolonga en subfamilias, géneros, etcétera.

Estudiar la biología de los virus es adentrarse en su evolución. Sobre el tema han aparecido dos obras de más que mediana calidad. En ambas hay colaboraciones españolas: *The evolutionary biology of virus* y *Molecular basis of virus evolution*. Esta última tiene su raíz en un simposio organizado por la Fundación March sobre "Coevolución de virus, huéspedes y vectores". Aunque convergen en muchísimos apartados, *Molecular basis* hace especial hincapié en una secuencia de trabajos de alcance más ceñido a la realidad experimental. Lo que no significa que falten apartados teóricos muy bien construidos, en particular, los de la parte quinta, donde encontramos una puesta al día del concepto de cuasiespecie vírica, de Eigen, y una reflexión sobre dinámica de la coevolución entre virus y huésped, de May. También prolonga el campo abarcado en *The evolutionary biology* con un repaso exhaustivo de distintas familias y exposición de técnicas.

No hay virus fósiles. Pero desde los años setenta el desarrollo de métodos de secuenciación de genes y determinación de las estructuras de las proteínas ha transformado el estudio de la evolución. El análisis de las secuencias génicas puso de manifiesto la homología y grado de parentesco. Información que refuerza la comparación fenotípica entre componentes de las proteínas. Así empezó a establecerse el modo y el tempo de evolución de poblaciones, especies, géneros e incluso taxones superiores de virus. Más cosas salieron a la luz; por ejemplo, la relación entre virus que parecían alejadísimos en la escala filogenética y la vinculación con el genoma de sus huéspedes.

En 1944 Macfarlane Burnet enumeraba tres hipótesis principales sobre el origen de los virus, que, con ciertos retoques, han persistido: retrógrada o degenerativa, llamada también hipótesis de Green-Laidlaw, prebiótica y celular. De acuerdo con la primera, los virus son descendientes degenerados de microorganismos patógenos; para la segunda hipótesis, los virus serían vestigios de un mundo

prebiótico o precelular, y, para la última, los virus son elementos genéticos que escaparon de las células.

La idea del origen prebiótico recobró especial vigor a raíz de los hallazgos de la actividad enzimática del ARN. Gilbert sugirió que el código genético de ARN pudo haber antecedido al de ADN. Era el mundo de ARN, que cada día recibe mayor respaldo. Nada impide, pues, que al menos algunos virus de ARN sean vestigios de esa era. Howard Temin ha sido el principal defensor de la tercera hipótesis, según la cual los virus surgieron de secuencias genéticas celulares. Primero habló de los protovirus, que ejemplificaba en el de la leucemia; el agente de ésta no sería un virus preexistente, sino que procedería, por cambio genético, de protovirus. Refinó más tarde su propuesta y la generalizó, sugiriendo que los retrovirus se originaban de elementos genéticos móviles.

Muchos genes los adquieren los virus por recombinación a partir de otros genomas, víricos y celulares. Es este un fenómeno común entre los retrovirus. La pseudo-recombinación, o redistribución de los segmentos de genomas, es habitual en otros. Hay, por fin, genes que han surgido *ex novo*. Además, del cotejo entre secuencias se desprende que los genes de la proteína del virión y muchas enzimas metabólicas, tales como las implicadas en el metabolismo de ácidos nucleicos y proteínas, han evolucionado a partir de un número limitado de genes parentales y están compartidos por muchos géneros.

¿Se originaron los virus monofiléticamente (a partir de un solo antepasado, al que siguió una diversificación evolutiva) o polifiléticamente (a partir de varios antepasados)? La cuestión tiene su miga. A falta de datos inequívocos, la propia diversidad vírica abona la hipótesis polifilética, vigente, aunque para ciertos autores la mayoría de los virus de ARN podrían haber brotado de un antepasado común, debiéndose la diversidad actual a divergencia evolutiva en el curso del tiempo.

Condición distintiva del virus es su parasitismo de la célula huésped, obligado para multiplicarse. ¿Hasta qué número? Garnett muestra en la primera de las dos obras mencionadas un cuadro matemático que representa la biología de poblaciones y la epidemiología de los parásitos a tenor de los factores interactuantes entre virus y huésped. Distingue dos niveles de estudio, a saber, la dinámica intrahuésped y la dinámica interhuéspedes del virus. Los dos niveles no son independientes. Para que un virus se transmita entre huéspedes, debe alcanzar cierta densidad dentro de cada huésped o situarse allí donde pueda diseminarse.

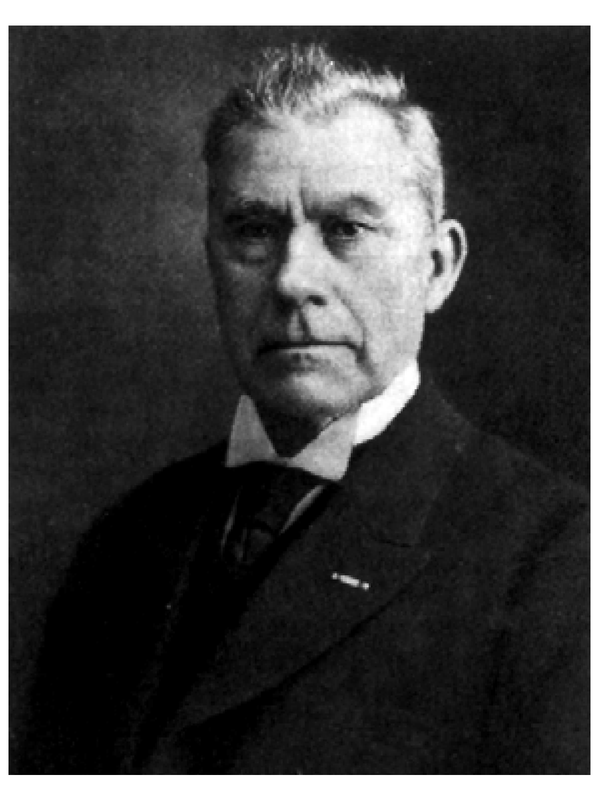
Heringa encuentra la evolución de los virus reflejada en las secuencias de polimerasa, donde descubre motivos que se repiten. Tales segmentos resultan, además, decisivos para la estabilidad estructural y operación de la enzima. Apoyados en el parentesco entre ellos se perfilan árboles filogenéticos. Por su parte, Goldbach bucea en el mar de datos genéticos y moleculares para descubrir supergrupos de ARN vírico y evolución de los virus de ARN. Se llega así a la convergencia de virus cuyo parentesco se ignoraba y se percata uno de que la evolución pivota sobre dos mecanismos principales: divergencia a partir de ancestros comunes y recombinación intervírica.

Sobre la cadencia de mutación y evolución de los virus de ARN escribe Esteban Domingo. Se apoya en el principio según el cual, para una complejidad genómica dada, existe una fidelidad de copia crítica por debajo de la cual la información no puede ya mantenerse. En este umbral de error, cualquier merma de fidelidad resulta en la catástrofe de error, capaz de arruinar toda la información. Las tasas de mutación puntual para el ADN celular se han estimado en 10^{-8} a 10^{-11} sustituciones por nucleótido y por tanda de replicación. En cambio, durante la replicación o transcripción inversa de ARN vírico las tasas de mutación van de 10^{-3} a 10^{-5} sustituciones por nucleótido copiado. El tamaño genómico de los virus de ARN es compatible con la baja fiabilidad en la copia, sin caer en la catástrofe de error. En resumen, las elevadas tasas de mutación, acopladas con ciclos de replicación altísimos, son rasgos que distinguen la genética de ARN de la genética del ADN celular.

Neutralistas y seleccionistas han llevado sus discrepancias al terreno de los virus. Suelen citarse ejemplos ya clásicos de la intervención de la selección natural. La introducción del myxoma en Australia, en el que una cepa altamente letal evolucionó hacia una virulencia intermedia, constituye un ejemplo vigoroso del papel estabilizador de la selección natural en la variabilidad vírica. Como muestran Levin, Pimentel y Robert May, el papel de virulencia alcanzado con el tiempo es una transacción entre virulencia y transmisibilidad.

En el mundo de la aplicación, el carácter perentorio de la pandemia del sida nos fuerza a empezar por este síndrome. En la búsqueda de un fármaco eficaz contra el virus de la inmunodeficiencia humana se han empeñado numerosos laboratorios, cuyas líneas principales se hilvanan en *The search for antiviral drugs. Case histories from concept to clinic*. Los trabajos iniciales sobre antivíricos prestaron atención a los análogos nucleosídicos, área de investigación que todavía prosigue con los análogos de segunda y tercera generación, más seguros y eficaces, aunque la cifra de fármacos obtenida es harto magra. La razón de tal parvedad se esconde en la propia naturaleza de los nucleósidos, bloques con los que juega la célula para la síntesis de ADN y ARN.

Por parte del organismo ha de tomarse en cuenta su resistencia y versatilidad. La mutación que experimenta el genoma del virus ante la presión de selección que ejercen los fármacos de una terapia prolongada labora en contra del diseño de estrategias antivíricas. Cuanto más eficaz



Martinus Willem Beijerinck (1851-1931)

es el fármaco, con mayor rapidez emergen genes mutantes. Lo mismo la polimerasa de ADN que la de ARN, así como la transcriptasa inversa, reflejan una notoria impotencia a la hora de mantener la fidelidad genómica. Ni cabe pensar tampoco en los procesos de edición y reparación de ADN.

Para superar esas limitaciones de la terapia se aducen dos estrategias posibles: combinar diversos fármacos y atacar el ciclo replicativo del virus. Con la primera estrategia, la acción aditiva o sinérgica perseguiría bloquear la maduración del virus, demorándola hasta que el sistema inmunitario acabara con la infección. Con la segunda habría de conseguirse fijar alguna proteína imprescindible para la replicación del virus. De ambos enfoques se ocupa el libro. El primer antivírico eficaz, la idoxuridina, se aplicó al tratamiento de la infección más común de la córnea, la keratitis por herpes. Lo creó Herbert E. Kaufman. Partió de la hipótesis de la necesidad de que el fármaco fuera eficaz una vez el virus hubiera penetrado en la célula. Más: tenía que actuar sobre un proceso esencial para la replicación vírica.

Dentro de los esfuerzos por hallar la terapia contra el sida, el descubrimiento y desarrollo de la zidovudina a comienzos de los ochenta por un equipo dirigido por Gertrude B. Elion coronaban un largo esfuerzo de trabajo que se remontaba a los años cincuenta en los laboratorios Wellcome. Complementaria de esa línea fue la búsqueda de un inhibidor no nucleosídico de la transcriptasa inversa de VIH-1 que llevó al hallazgo de la nevirapina. “Cinco años después de la descripción del síndrome de la inmunodeficiencia adquirida y unos tres después del descubrimiento del tipo 2 del virus de la inmunodeficiencia humana, empezamos (Julian Adams y Vincent J. Merluzzi) a buscar un agente terapéutico contra la proteasa de VIH-1. Nos propusimos estudiar la proteasa de VIH-1, su sustrato y el uso de posibles péptidos inhibidores.” Ese inhibidor adecuado resultó ser la nevirapina.

Se encontraron otros inhibidores de la transcriptasa inversa de VIH-1, en particular la familia TIBO. El núcleo de investigación en este caso se formó en torno a Erik De Clerq, de la Universidad Católica de Lovaina, quien se había especializado en quimioterapia antivírica. Entre los virus rastreados se contaban retrovirus murinos, para los que se habían desarrollado modelos antivíricos *in vitro* e *in vivo*. El grupo había llegado a la conclusión de que, al menos en teoría, el ciclo reproductor del VIH presentaba varios estadios que podrían ser vulnerables a la intervención quimioterapéutica. La investigación desembocó en el descubrimiento de un compuesto tetrahidro-5-metilimidazol benzodiazepin-2 con un sistema de anillo tricíclico (TIBO). En los inhibidores de la transcriptasa inversa pusieron también su esperanza, desde mediados los ochenta, los laboratorios Merck. Los laboratorios Roche se orientaron, en esa carrera por descubrir un antivírico definitivo, hacia el bloqueo de una enzima distinta, la proteinasa de VIH.

Si no olvidamos que la virología nació de la fitopatología y reflexionamos sobre la importancia de la agricultura en la vida del hombre, no necesitaremos ponderar la oportunidad en esta reseña de *Resistance to Viral Diseases of Vegetables. Genetics and Breeding*. Los virus vegetales ocasionan pérdidas devastadoras, en cantidad y calidad, de las cosechas. Además, a diferencia de otros plagas y patógenos, los productos químicos se han mostrado ineficaces para atajar la infección vírica. Ha habido que centrarse en la mejora vegetal y explorar la ingeniería genética de modificación del genoma que confieran la resistencia necesaria contra la invasión.

Los dos conceptos fundamentales de la fitopatología vírica son el de resistencia y sensibilidad. Por paradójico que parezca, no existe una definición de los mismos, como tampoco hay unanimidad en otros términos frecuentes en este ámbito: inmunidad, hipersensibilidad y tolerancia, que nos remiten a la diferente reacción del huésped ante la agresión del patógeno. Puede aceptarse que, en virtud de la tolerancia, una planta huésped se presta a la replicación vírica sin sufrir una enfermedad concomitante. Esta separación entre el proceso de replicación vírica y el proceso consiguiente de la patogénesis nos lleva a la definición de resistencia: inhibición de cualquier estadio del ciclo vital vírico o del desarrollo de los efectos patogénicos del huésped. Tenemos un caso especial de resistencia cuando, del encuentro entre virus y planta, aparecen manchas necróticas, que indican una respuesta hipersensible que evita la dispersión vírica y, por tanto, la patogénesis.

La cantidad de virus presente en la planta no guarda siempre correlación con la gravedad de los síntomas de la enfermedad. De hecho, dos patógenos víricos, subvíricos o viroides que presenten un estrecho parentesco y se multipliquen con similar eficacia en sus huéspedes podrían inducir distintos comportamientos morbosos. A su vez, dos virus procedentes de grupos taxonómicos disímiles podrían producir síntomas parecidos, según queda puesto de manifiesto con el extenso número de virus vegetales que portan el nombre de “mosaico”. Por último, los agrónomos saben muy bien que un mismo virus que haya atacado dos plantas que difieren sólo por la presencia o ausencia de un determinado gen de la resistencia puede producir síntomas completamente diferentes.

Queda mucho por desentrañar sobre la variabilidad genética de las cepas. El término *patotipo* designa agrupaciones de cepas que podrían provocar síntomas similares, en el bien entendido de que la determinación de un patotipo ha de fundarse en la interacción genética entre huésped y patógeno. A este respecto, podemos comparar los patotipos víricos con las razas fisiológicas de hongos patógenos de los vegetales.

Fijémonos, por dar un ejemplo, en la familia de las Cucurbitáceas, que comprende 118 géneros con 825 especies. A ese grupo pertenecen sandías, melones, pepinos y calabazas, entre las hortalizas más comunes. Las Cucurbitáceas sufren numerosas enfermedades provocadas por bacterias, hongos y virus. Cuando el agente es el virus, la agresión resulta por lo común letal y difícil de controlar. Durante años, el control químico de los vectores, insecticidas sobre todo, y la erradicación de los reservorios de virus (herbicidas) han constituido los medios principales para prevenir las enfermedades víricas. Estas y otras medidas (aceites minerales, quema de las cosechas infectadas y estricta vigilancia sanitaria de los invernaderos) tienen una eficacia limitada y deben repetirse cada año.

¿Qué aportan la mejora y la biotecnología? Desde hace años, los métodos de control han venido haciendo hincapié en la selección de plantas resistentes a partir de variedades existentes, variedades primitivas o razas locales. Suele complementarse esa medida con el rastreo de los genes de resistencia y, una vez caracterizados, se incorporan en las nuevas variedades a través de la hibridación dirigida o retrocruzamiento. Por último, se opera también la protección cruzada, que consiste en la inoculación de una cepa inocua o atenuada, para defender la planta de las cepas virulentas. (L. A.)

Ecología

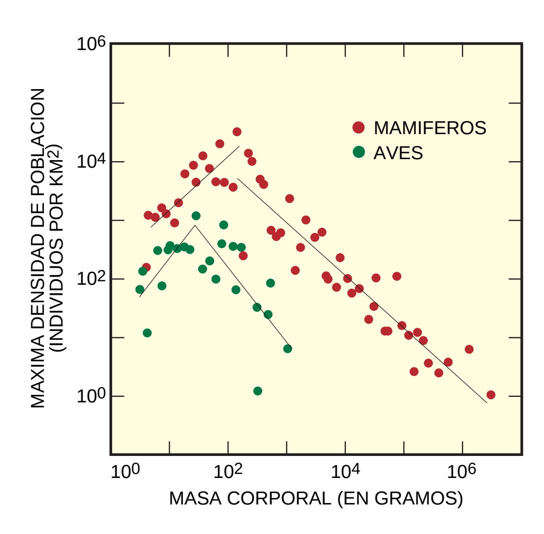
Honrada aproximación

MACROECOLOGY, por James H. Brown. The University of Chicago Press; Chicago, 1995.

La vieja ecología ha experimentado un crecimiento tan desaforado, que cualquier mención de ella requiere un calificativo que precise de qué se va a tratar. Ahora los calificativos se adhieren en calidad de prefijos más tenaces. En un cuaderno reciente del Boletín de la Sociedad Ecológica de América, Robert P. McIntosh escribía sobre la "Metaecología" y refería cómo ya había dado con otras finezas lingüísticas tales como metapoblación, metacomunidad, metaanálisis, metarreglas, metaclímax, metateoría y hasta ecología metafísica. Meta en el sentido de más allá, es decir, refiriéndose a algo más elevado o supuestamente con mayor poder explicativo. El prefijo meta es pretencioso, pero macro significa simplemente grande y suena a más honrado. En el libro que comento se usa sin malicia, para referirse a una serie de aspectos de las comunidades naturales que se manifiestan más propiamente cuando las características cuantificables se comparan dentro de un marco amplio a escala continental.

El autor no cree, por lo que parece, que se pueda ir mucho más allá de establecer simples relaciones (estadísticas) entre descriptores, en este caso valederas sobre escenarios relativamente extendidos en el espacio o el tiempo. El tema se introduce preguntándose las probabilidades de extinción que amenazan, una a una o a grupos de ellas, a especies de mamíferos que ahora habitan algunas tierras elevadas entre las Montañas Rocosas y la Sierra Nevada de Norteamérica. A partir de datos empíricos sobre la relación entre área habitable y número de especies, trata de anticipar lo que ocurriría en el supuesto de un cambio climático que redujera la extensión de las áreas favorables y actualmente ocupadas. Macroecología, siguiendo este ejemplo, se referiría a distribuciones estadísticas de especies, observables sobre regiones a una escala más bien grande.

El tema tiene muchos precedentes, pero no está agotado ni mucho menos, y siempre se presta a consideraciones críticas, en este caso notablemente juiciosas, como se puede esperar de un ecólogo con larga experiencia. Su posición es relativamente conservadora: acepta un concepto de comunidad próximo al de Gleason, y dentro de las comunidades, nichos al estilo de Hutchinson. La comparación entre diferentes comunidades permite reconocer características estructurales comparables. Eligiendo bien los caracteres descriptivos es posible proponer tipificaciones satisfactorias. Hace un esfuerzo, apenas necesario, para conciliar la visión más individualista a la que han sido propicios Gleason y Whitaker con las idealizaciones aplicadas a la estructura debidas a Hutchinson y MacArthur. En general se mantiene al margen de muchas disquisiciones de la última generación de ecólogos, que el reseñante tampoco cree necesarias. El análisis de relaciones entre abundancia y distribución dan fe de la frecuente asociación entre 105 factores que las determinan.



Distribución de la máxima densidad de población en función de la masa corporal de aves y mamíferos terrestres

Tamaños, abundancias y requerimientos energéticos son factores que configuran significativamente, desde dentro, la composición de las diferentes comunidades. Y pueden dar lugar a regularidades, también estadísticas y de tipo general. Siempre que se trata de tamaños, de necesidades metabólicas y de espacio vital, se sugieren problemas de optimización. También se justifican aproximaciones cuantitativas a los fenómenos de dispersión y a la distribución estable dentro de los espacios apropiados. Se confirman las regularidades reconocidas de antiguo en las relaciones entre tamaño de especies, amplitud de sus áreas y frecuencias de las distintas combinaciones posibles.

La dimensión de las áreas en el sentido de los paralelos y de los meridianos y la extensión real de sus fronteras muestran regularidades significativas. Supuestas propiedades fractales de las áreas descansan más en la habilidad de los cartógrafos o en las limitaciones a que están sometidos que en la realidad de los datos. Comenta la llamada regla de Rapoport, según la cual la extensión de las áreas de las especies referida a los grados de latitud decrece a medida que la latitud baja y las especies se hacen más numerosas. Es tema que no se puede desligar de las diferencias latitudinales de diversidad. Se repiten los intentos de encontrar explicación a las relaciones entre el área visitada invidualmente, la corpulencia y metabolismo y la extensión de las áreas totales de cada especie. Es tema atractivo, pero las relaciones entre masa corporal, metabolismo y densidad de la población varían según los grupos taxonómicos y el conjunto de sus adaptaciones y niveles de densidad poblacional.

Lo ideal sería relacionar dentro de una visión amplia de las funciones de regulación, las fluctuaciones, la dirección del control en cadenas tróficas, la probabilidad de extinción y la "biogeografía insular", todo ello susceptible de manifestar coherencia en una proyección geográfica. Tal intento conduciría a examinar el fenómeno de la especiación, pero no menciona que la repetición de las sucesiones puede facilitarla y darle regularidades. Tiende a ver la diversidad como resultado final de muchos factores aleatorios.

El libro se orienta a analizar los motivos de distribución "macroecológicos", sin descender eficazmente a lo que puede estar en su base: la operación de los que se podrían calificar de mesoecológicos y de microecológicos. Quizá la escala apropiada para contemplar aspectos de las "macrodistribuciones" no proporciona la clave para entenderlos, cuando las distribuciones son consecuencia de la operación de fenómenos independientes de cualquier dimensión geográfica. El autor acepta que el grado de adecuación (*fitness*) se fundamenta en la eficiencia en la conversión de energía en trabajo biológico; pero esta opinión, que comparto, tiene, de momento, la dificultad de cómo integrar la utilización de energías naturales que proceden por vías distintas de la del metabolismo celular, y así representan máquinas de distintas eficacias. (R. M.)

Christian de Duve

Las restricciones del azar

Entre biólogos, se ha puesto de moda destacar el papel de lo contingente en el origen y la evolución de la vida, el hombre y la mente. De estos trascendentales fenómenos se dice que son fruto de combinaciones de acontecimientos fortuitos, improbables en grado sumo. Pero la tesis de que el origen de la vida fue en extremo improbable es falsa. La vida no surgió de golpe. Sólo hubiera sido así por milagro. Si la vida apareció merced a fenómenos explicables, forzoso hubo de ser que siguiera una serie muy larga de procesos químicos, conducentes a la formación de estructuras moleculares de complejidad creciente. Tales procesos, por su naturaleza química, hubieron de ser determinísticos y reproducibles, y habrían de venir impuestos por las condiciones fisicoquímicas en que acontecieron.

El gran número de pasos requeridos refuerza su carácter determinístico. No es inverosímil que se den sucesos individuales de probabilidad muy pequeña, pero sí lo es que acontezca una cadena conectada de tales acontecimientos. Se están repartiendo sin cesar manos de bridge, cada una con probabilidad de 5×10^{28}. Pero la misma mano prácticamente nunca se da dos veces sucesivas. Dada la naturaleza de la materia y dadas las condiciones en la Tierra de hace cuatro mil millones de años, forzoso resultaba que surgiera la vida, en forma no muy diferente, en sus propiedades moleculares básicas a lo menos, de su forma actual.

¿Qué decir ahora de la probabilidad de que la evolución llegase a producir seres conscientes? En este caso, los abogados de lo fortuito parecen pisar firme tierra darwinista. Mal puede hoy dudar un biólogo de que cada paso evolutivo arranca de un cambio fortuito y heredable, cuyos resultados los pone a prueba la selección natural. La consecuencia, evidente, es que el azar gobierna las direcciones de la evolución. Tal es la opinión mayoritaria, aunque necesitada de matización.

El azar no excluye la inevitabilidad. Las restricciones que delimitan la acción del azar revisten importancia crítica. Una de ellas es el número de opciones. Cuando se lanza una moneda las posibilidades son sólo dos; son seis al lanzar un dado, 36 al girar la ruleta y 5×10^{28} al repartir una mano de bridge. Tal número puede ser grande, pero siempre es finito. Y otro tanto vale para las mutaciones posibles. No sólo su número es limitado, sino que ni siquiera es extremadamente grande, en términos relativos. Esta tesis queda rápidamente corroborada por la experiencia.

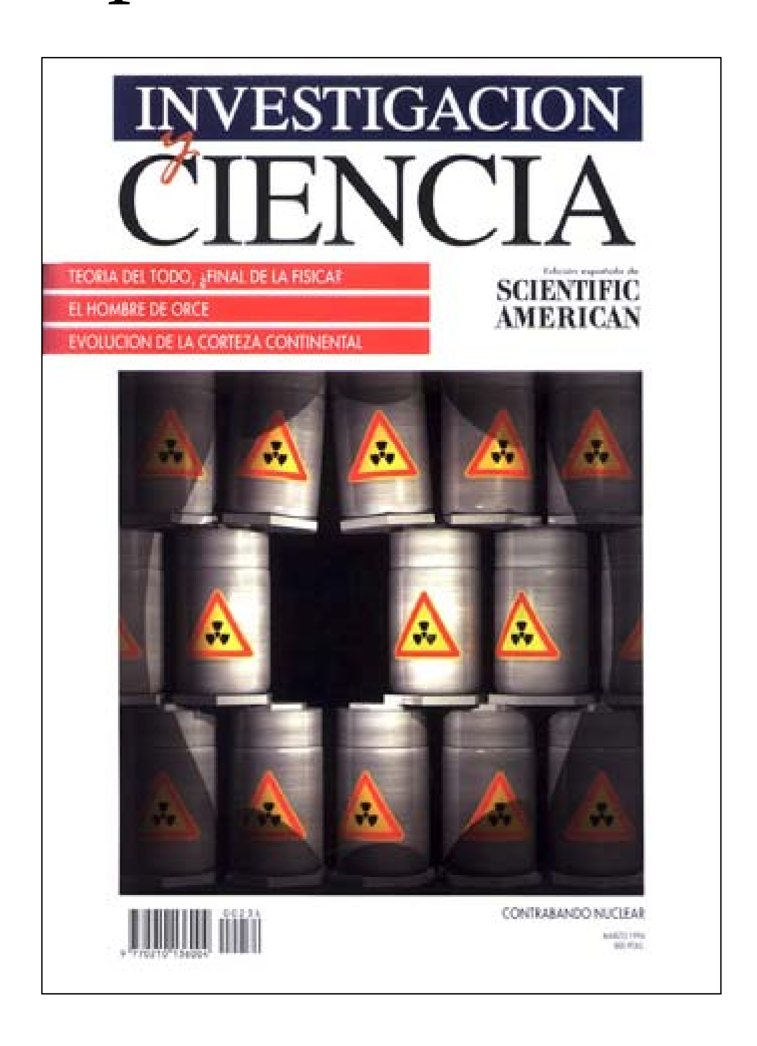
En el curso de pocos decenios han aparecido bacterias resistentes a los antibióticos, parásitos transmisores de malaria resistentes a la cloroquina, mosquitos resistentes al DDT y malezas resistentes a los herbicidas. Y ello no ha ocurrido gracias a mutaciones aleatorias, sino a causa de que la difusión de drogas ha concedido de pronto la oportunidad a mutaciones banales de demostrar que son beneficiosas y quedar seleccionadas. Si en períodos tan breves pueden producirse cambios de gran alcance como éstos, es verosímil que tiempos evolutivos de millones de años permitan que se dé cualquier eventualidad útil. En contra de una idea difundida, la evolución no obedece tanto al capricho de mutaciones aleatorias —aunque así pueda suceder en ocasiones— como a mutaciones que esperan, por así decirlo, su oportunidad para incidir en el curso de la evolución.

En los organismos pluricelulares, la estructuración corporal preexistente impone a la evolución restricciones adicionales. Las mutaciones efectivas quedan limitadas al pequeño número de genes que controlan el desarrollo de un organismo —caso de los genes homeóticos— y han de ser tales que modifiquen el plan de desarrollo de forma conducente al éxito evolutivo o, al menos, compatible con él. La mayoría de las alteraciones que cumplen tales condiciones no modifican el plan fundamental de estructuración del organismo. Caracterizan lo que llamo "evolución horizontal" y conducen a la biodiversidad. Es probable que las especies de insectos pasen de un millón, pero todas son insectos. Es en la diversificación de esta clase donde lo contingente y lo fortuito desempeñan su papel directivo, sobre todo, bajo la forma de condiciones ambientales que por azar confieren a determinadas mutaciones una ventaja selectiva.

Mucho menor es el número, por ser muchas más las restricciones, de los cambios que incrementan de forma notable la complejidad de los planes de estructura corporal (evolución "vertical"). No hay duda de que tales restricciones consienten desarrollos que no han llegado a darse en la Tierra, tal vez acontecidos en otros lugares, y recíprocamente. Pero ciertas direcciones podrían ser casi obligatorias. La aparición de seres pensantes, por ejemplo, parece mucho menos improbable de lo que suele decirse. En cuanto surgieron las neuronas y empezaron a interconectarse, la vida progresó hacia la formación de redes cada vez más complejas, alentadas sin duda por las ventajas selectivas que conllevan. Hace seis millones de años, el cerebro de un chimpancé representaba el ápice de esta progresión evolutiva. Hace tres millones, fue el de Lucy. En nuestros días es la mente humana. Lo que pueda ser dentro de seis millones de años es pura conjetura.

La vida y la mente parecen constituir imperativos cósmicos, inscritos en el tejido del universo. Dada la ocasión, la materia hará surgir la vida y la vida, a la mente. Las condiciones de nuestro planeta proporcionaron esa oportunidad. Condiciones que podrían darse en otros muchos puntos del universo. De ser así, y si las opiniones defendidas en este ensayo son correctas, han de existir muchos otros planetas vivos, parte de los cuales, cuando menos, habrá evolucionado o va a evolucionar hacia la formación de seres conscientes —algunos de ellos, tal vez, más avanzados que nosotros.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



RESTRICCION DE CALORIAS Y ENVEJECIMIENTO, por Richard Weindruch

Comer menos sin dejar de tomar suficientes proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Esta prescripción obra milagros en la salud y la longevidad de los roedores. ¿Ayudará también a los seres humanos?

EL HOMBRE DE ORCE, por Domingo Campillo y José Gibert

En 1982 se exhumó un fragmento craneal en Venta Micena. Tras un decenio largo de polémicas, parece ahora asentado que perteneció a un homínido de la especie Homo sapiens.

REDES NERVIOSAS DE LA LOCOMOCION DE VERTEBRADOS, por Sten Grillner

Los movimientos de que se valen los animales para nadar, correr y volar están controlados por redes nerviosas especializadas. Ya conocemos la circuitería que inerva la lamprea, un pez carente de maxilares.

LA EVOLUCION DE LA CORTEZA CONTINENTAL, por S. Ross Taylor y Scott M. McLennan

Los elevados continentes deben su existencia a una larga historia de actividad tectónica de las diversas placas.

EXPLICARLO TODO, por Madhusree Mukerjee

Una simetría nueva, la dualidad, está cambiando el pensamiento de los físicos acerca de las partículas fundamentales, o cuerdas. Marca además el camino hacia una teoría del todo.

LA BASE MOLECULAR DEL TETANOS Y EL BOTULISMO, por Giampietro Schiavo, Ornella Rossetto y Cesare Montenucco

Las neurotoxinas responsables de estos dos síndromes son zincproteasas neuroespecíficas que penetran en el interior de la células nerviosas y bloquean la liberación de neurotransmisores, provocando parálisis típicas.

FACTORES TECNOECONOMICOS EN LA INDUSTRIA DE LOS SEMICONDUCTORES, por G. Dan Hutcheson y Jerry D. Hutcheson

Tal vez estén contados los días de desarrollo vertiginoso, pero ello puede obligar a los fabricantes a ofrecer una diversidad mayor.

LA AUTENTICA AMENAZA DEL CONTRABANDO NUCLEAR, por Phil Williams y Paul N. Woessner

Por mucho que los incidentes producidos hayan recibido una desmesurada interpretación, los peligros reales del contrabando nuclear son demasiado importantes para ignorarlos.

